

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

معهد الآثار  
قسم الصيانة والترميم



جامعة الجزائر 2

أطروحة لنيل شهادة الدكتوراه ل. م. د في علم الآثار  
تخصص صيانة وترميم الممتلكات الثقافية

دراسة تأثير الجليد على الحجارة المصقولة وعلاقته  
بالمسامية-الموقع الأثري لجميلة-

تحت إشراف:  
أ.د / أرزقي بوخنوف

إعداد الطالب:  
جمال موساوي

السنة الجامعية: 2019 . 2020م

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الجزائر

معهد الآثار

قسم الصيانة والترميم



أطروحة لنيل شهادة الدكتوراه ل. م. د في علم الآثار

تخصص صيانة وترميم الممتلكات الثقافية

دراسة تأثير الجليد على الحجارة المصقولة وعلاقته

بالمسامية -الموقع الأثري لجميلة-

تحت إشراف:

أ.د / أرزقي بوخنوف

إعداد الطالب:

جمال موساوي

لجنة المناقشة:

أ.د. / عائشة حنفي..... رئيسة

أ.د. / بوخنوف أرزقي..... مشرفا ومقررا

د / بدر الدين بلعيبود..... عضوا

د / امير ربيعين..... عضوا

د / سيد ادريس يوسف..... عضوا

السنة الجامعية: 2019 . 2020م

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



إلى من علماني أنّ الحياة كفاح إلى أبعد أمد.

إليكم أهدي هذا العمل.

أبي وأمي وأخواتي.





# إِعْتِرَافٌ وَامْتِنَانٌ

الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على أشرف الأنبياء والمرسلين سيدنا محمد وعلى آله وصحبه ومن تبعهم بإحسان إلى يوم الدين، أما بعد، أشكر الله تعالى على فضله وتيسيره لإتمام هذا العمل في أحسن الظروف.

وفاءً واعترافاً مني بالجميل، أتقدم بالشكر للأستاذ المشرف، الدكتور: " أرزقي بوخنوف" على كل ما قدمه لي من نصائح وتوجيهات، فأسال الله يجعل ما يقدمه في ميزان حسناته.

والشكر موصول لكل من ساعدني وقدم لي يد العون، وزودني بالمعلومات لإتمام هذا البحث، ونخص بالذكر: الدكتورة سعاد بن شامة، والأستاذة: وهيبة خليل، والدكاترة: محمد بوجطو، إلياس يريقي، نذير عيسو وكل من الأساتذة: عبد الرحيم رزيق، عادل قندوزي، والمهندسين: كمال حناشي، والعيد حمدي، وكل عمال الموقع الأثري لجميلة وعلى رأسهم السيد المدير مصباح، وكل من السادة سليم فليقا، ومبروك سي ناصر.

كما أتوجه بالشكر إلى طاقم إدارة معهد الأثار، أعضاء لجنة التكوين وكافة زملائي في الدفعة.

ولمن فاتني ذكرهم لهم مني جزيل الشكر والتقدير.

المختصرات

---

قائمة المختصرات

## المختصرات

### قائمة المختصرات

الرمز	التسمية بالفرنسية	الوحدة	التسمية بالعربية
1ع	Calcaire dur à grain fin	/	الحجارة الكلسية الصلبة ذات الحبيبات ناعمة
2ع	Calcaire bioclastique	/	حجارة البيوكلاست
3ع	Tuf caverneux	/	حجارة التوف الكهفي
DRX	Diffraction des rayons X	-	حيود الأشعة السينية
Vp	Vitesse de propagation des ondes ultrasonores	م/ثا	سرعة الموجة فوق الصوتية
FRX	Fluorescence des rayons X	-	فلورة الأشعة السينية
Msec	Masse sèche	غ	الكتلة الجافة
M <sub>sat</sub>	Masse saturée	غ	الكتلة المشبعة
M <sub>sub</sub>	Masse hydrostatique	غ	الكتلة الهيدروستاتيكية
CRAPC	Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico – Chimiques		المركز الوطني للبحث العلمي والتقني للتحاليل الفيزيائية والكيميائية
N <sub>t</sub>	Porosité totale	%	المسامية الكلية أو الإجمالية

## المختصرات

الرمز	التسمية بالفرنسية	الوحدة	التسمية بالعربية
<b>N<sub>48</sub></b>	Porosité à 48 heures	%	مسامية مقاسة بعد 48 ساعة
<b>S<sub>48</sub></b>	Coefficient de saturation	%	معامل التشبع
<b>A<sub>B</sub></b>	coefficient d'absorption d'eau	%	معامل امتصاص الماء
<b>R<sub>c</sub></b>	Résistance à la compression uniaxiale	MPa	مقاومة الضغط أحادي المحور
<b>I<sub>c</sub></b>	Indice de continuité	/	مؤشر الاستمرارية
<b>S</b>	Surface	سم <sup>2</sup>	المساحة
<b>V</b>	Volume	سم <sup>3</sup>	الحجم

المصطلحات

---

قائمة المصطلحات

# المصطلحات

## قائمة المصطلحات

التسمية بالفرنسية	التسمية بالعربية
Eclatement	إنفلاق، إنبثاق، تبثر، تقرح
Délitage	إنفصال طبقي، التّكّك
Clivage	الإنقسام، انقسام
Salissure et souillure	الأوساخ المترسبة
Fragmentation	التّجزؤ
Alvéolisation	التّجوف
Subfloreescence	التّزهّر الخفي أو الأملاح الخفية
Efflorescences	التّزهّر السطحي أو ترسبات الأملاح أو الطّفح الملحي.
L'écaillage	التّشّش، تحرشف
Opus Quadratum	تقنية النّظام الكبير
Opus Africanum	التّقنية الإفريقيّة
Opus Testaceum" أو "Opus latericium	التّقنية القائمة على قطع الآجر
Opus mixtum	التّقنية المركبة أو المختلطة
Exfoliation	التّورق
Perforation et Pitting	التّقوب والتّقور
Pierre de taille	الحجارة المّصقولة
Moellons	الدّبّش

## المصطلحات

التسمية بالفرنسية	التسمية بالعربية
cryosuccion	الشَّفط المبرد
Les fissures et micro- fissure	الشَّقوق والشَّرُوخ الدَّقِيقَة
Vermiculé	شكّل دودي
Litages	الطَّبَقَات
limite de fatigue	عتبة التَّعب
Etuve de séchage	فرن التَّجْفِيف
Pelage	قشارة
Fractures	الكسور
Micro pores	المسامات الصَّغيرة
Macro pores	المسامات الكبيرة
Méso pores	المسامات المتوسطة
Microporosité	المسامية الدَّقِيقَة
Macroporosité	المسامية الكبيرة
Mésoporosité	المسامية المتوسطة
Porosité Piégée	المسامية المحاصرة
Porosité fermée	المسامية المغلقة
Porosité ouverte	المسامية المفتوحة أو الحرة

مقدمة

---

مقدمة



## مقدمة

### مقدمة

يُعتبر التّراث على اختلاف أشكاله ثروة لا تُقدر بثمن، لأنّه خير شاهد حي على تاريخ وحضارة الأمة وعراقتها وذاكرتها، فضلاً عن أنه جزء من هويتها الوطنية، وأحد مكونات ذاكرتها، وباعتبار المواقع الأثرية جزءاً هاماً من هذا التّراث، فإن فقدانها بأي شكل من الأشكال لا يمكن أن يعوض، لذا فحمايته أمر واجب فضلاً عن أنها تعتبر من العمليات الهامة، كونها تساهم في الحفاظ على موارد التّراث المستقبلي للأجيال القادمة، ويمكن أن يتحقق هذا من خلال دراسة الأخطار التي تتهدد هذا التّراث وبشكل خاص المواقع الأثرية.

ويرجع الفضل في بقائها صامدةً ليومنا هذا، لقوة ومتانة مواد بنائها، وبشكل خاص الحجارة، التي تعد من أهم المواد الطّبيعية التي استخدمها الإنسان منذ العصور القديمة، وهذا ما دلّت عليه العديد من المعالم الأثرية المنتشرة في ربوع العالم، وعلى الرّغم من مقاومتها للظروف المناخية وعامل الزمن وإهمال الإنسان، إلا أنّه يلاحظ على العديد منها مظاهر تلف بدرجات متفاوتة، والتي تعود إلى عوامل متعددة: منها ما ترتبط بطبيعة البنية الداخلية للحجارة المتشكّلة منها، فعدم تجانس أو ضعف التّركيبة المعدنية أو الفلزية، و/أو تدني خواصها الفيزيوميكانيكية، يمنحها صلابة ضعيفة مما يحفز تعرضها للتلف، ومنها ما ترتبط بالبيئة التي تقع فيها هذه المعالم، والتي تولد عوامل تهاجم الحجارة المتشكّلة منها، وفي مقدمتها العوامل المناخية، إذ تعمل هذه العوامل منفردةً أو مجتمعةً في إحكام دائرة التّلف التي تخضع لها هذه الحجارة، وإيصالها إلى مراحل متقدمة جدّاً من التّدهور، مما يؤثر على ديمومتها وبالتالي استقرار حالة الآثار المتشكّلة منها.

وبما أنّ منطقة شمال الجزائر تشهد تغيراً مناخياً وبشكل خاص الإنخفاض في درجات الحرارة، الأمر الذي سيعزز ويحفز ويضاعف من التّدهور الذي تشهده الممتلكات الأثرية المكشوفة وفي مقدمتها المواقع الأثرية، وبذلك أصبحت هذه الممتلكات الأثرية في خطر يهدد ديمومتها بسبب هذا التّغير، الذي ينتج عنه ما يعرف بظاهرة الجليد، الذي يعد من أخطر العوامل التي تهدد استقرار وتماسك مواد بنائها الحجرية، وذلك نتيجة فقدانها لصلابتها ومتانتها مما ينعكس سلباً على سلامة وكمال وديمومة البناء الأثري المتشكّل منها.

## مقدمة

إنّ دراسة تدهور الحجارة بفعل الجليد تشكّل أهمية كبيرة في مجال الحفاظ على الآثار، كونها تساهم في إدراك التّدهور الذي يصيب الحجارة وتقدير التّغيرات التي تحدث لخواصها، ناهيك عن اختيار أنجع الأساليب والمواد في أعمال الصّيانة والتّرميم والوقاية.

ومن أجل معرفة التّأثير الذي يحدثه الجليد على الحجارة المستخدمة في بناء هياكل المباني، وقع اختيارنا على أحد أهم المعالم القديمة التي تزخر بها الجزائر، والذي يتواجد في بيئة مناخية شديدة البرودة تعرف انخفاضاً كبيراً في درجة الحرارة تصل إلى ما دون الصّفر درجة مئوية، الأمر الذي يعرضه لآليات التّلف الناتجة عن ظاهرة الجليد بشكل موسمي و/أو يومي، مما يسمح لنا بفهم وإدراك التّدهور الذي يسببه الجليد، وهو الموقع الأثري لجميلة، المعروف قديماً بـ "كويكول"، والذي يتواجد في إقليم الهضاب العليا بولاية بسطيف كموضوع للدراسة تحت عنوان:

### دراسة تأثير الجليد على الحجارة المصقولة وعلاقته بالمسامية -الموقع الأثري لجميلة-.

ويكمن الهدف العام من هذه الدّراسة إلقاء الضوء على هذا الموقع الأثري، وتشخيص أبرز مظاهر التّلف المنتشرة على الحجارة المشكلة لهياكله، واستخلاص أهم العوامل التي أوصلتها للحالة التي هي عليها الآن.

ولا نهدف إلى تحليل شامل لعوامل التّلف التي يتعرض لها هذا الموقع الأثري، بل هدفنا الرّئيسي هو دراسة تأثير أحد هذه العوامل ألا وهو الجليد، ومعرفة مدى التّغير الذي يحدث لخواص الحجارة المشكلة لمعالمه تحت فعل هذا العامل، أو بعبارة أخرى تقدير نسب التّغيرات التي تحدث لخواص الحجارة الفيزيوميكانيكية التي ترتبط بشكل مباشر أو غير مباشر بصلابتها ومقاومتها، واستخلاص العلاقة التي تربط فعل الجليد بإحدى خواص الحجارة المتمثلة في المسامية، وذلك لأنها الوسط الذي يتم على مستواها العديد من آليات التّلف المصاحبة لتحول الماء إلى جليد وبذلك تكون أولى الخواص تعرّضاً للفعل السّلبى للجليد، وهذا ما سيؤثر على جودتها مما ينعكس سلباً على باقي خواص الحجارة، وهي بذلك تعد من أبرز الخواص التي تلعب دوراً رئيسياً في تعزيز وتحفيز تدهور الحجارة.

## مقدمة

وتتبع اشكالية البحث في كون الحجارة الطّبيعة المستعملة في بناء المعالم الأثرية تخضع لظروف ظروف مناخية قاسية تفقدها صلابتها، الأمر الذي ينعكس سلباً على ديمومتها، نتيجة تجمد وذوبان محتواها المائي الذي يسكن مسامتها، وبما أنّ الموقع الأثري لجميلة يقع في منطقة تشهد انخفاض في درجات الحرارة إلى ما دون 0°م، الأمر الذي يجعل الحجارة المشكل لمعالمه عرضة لخطر دورات تجمد وذوبان محتواها المائي، ومن هذا المنطلق يمكن إثارة الإشكالية الأساسية التالية:

ما التأثير الذي يحدثه الجليد على حجارة الموقع الأثري لجميلة؟

كما يتفرع عن هذا السؤال العام أسئلة فرعية لها صلة بموضوع الدراسة هي:

- ما هي أهم مظاهر تلف حجارة الموقع الأثري لجميلة؟
- وما العوامل المتسببة في ذلك؟
- ما التأثير الذي يحدثه الجليد على خواص هذه الحجارة؟
- وما العلاقة التي تربط مسامية الحجارة بعامل التلف الجليد؟
- وهل تتأثر مسامية الحجارة سلباً أم إيجاباً؟
- وما العوامل المتحكمة في تلف الحجارة بفعل الجليد؟ وكيف تؤثر هذه العوامل؟
- ما هي حجارة الموقع الأثري الأكثر تأثراً بفعل الجليد؟
- ما أهم الطرق والإستراتيجيات التي يمكن إتباعها للحفاظ على حجارة هذا الموقع الأثري؟

ولمعرفة هذا التأثير اعتمدنا على دراسة مجموعة من المعايير، التي ترتبط بشكل مباشر أو غير مباشر بمقاومة وصلابة الحجارة، والتي من خلالها يمكن تحديد نسبي للتغير الذي يحدث لخواص الحجارة بعد اخضاعها لدورات التجمد والذوبان، ويمكن حصر أهم هذه المعايير فيما يلي:

## مقدمة

• التغير في الخصائص الفيزيائية وبشكل خاص:

- الكثافة؛

- المسامية؛

- معامل الإمتصاص والتشبع؛

• التغير في الخصائص الميكانيكية من خلال المعايير التالية:

- سرعة الموجة فوق الصوتية  $V_p$ ؛

- ومؤشر الإستمرارية  $I_c$ ؛

- المقاومة الميكانيكية للضغط أحادي المحور  $R_c$ .

وللإجابة على هذه التساؤلات المطروحة، إعتدنا منهجية تقوم على الجمع بين المنهج الوصفي الذي يقوم على التشخيص للتعرف أكثر على الموقع الأثري ومظاهر تلفه ودرجة حفظه، والمنهج التجريبي الذي يقوم على التجارب الميدانية والمخبرية للتعرف على خصائص المواد المشكلة لهياكل بنايات الموقع، والتغيرات التي تحدث لها تحت فعل الشبخوخة الإصطناعية عن طريق دورات التجمد والذوبان.

لقد قامت درستنا على تقسيم البحث إلى جانبين، جانب نظري يتضمن جمع معلومات عن الموقع الأثري، وأهم مواد بنائه الحجرية وأنواعها وخواصها، وأهم عوامل التلف التي تتعرض لها الحجارة في المواقع الأثرية بشكل عام والموقع الأثري لجميلة بشكل خاص، فضلاً عن آليات التلف المتولدة عن الجليد، وأهم العوامل المتحكمة فيه، وأبرز مظاهر التلف التي يسببها.

أما الجانب التطبيقي فيتضمن أيضاً جانبين، الأول مخصص للبحث الميداني، والثاني مخصص للعمل المخبري، فالجانب الميداني من خلال تشخيص معالم الموقع الأثري لمعرفة مظاهر التلف والعوامل المتسببة في ذلك، إلى جانب الإختبارات الحقلية لتحديد درجة صلابة والمقاومة الميكانيكية للحجارة باستخدام فحوصات غير إتلافية، أما الجانب المخبري فيتضمن القيام باختبارات مخبرية لعينات من الحجارة لتحديد خواصها الجوهرية، ولمعرفة

## مقدمة

تأثير الجليد على الحجارة قمنا بتطبيق شيخوخة اصطناعية عن طريق دورات التجمد والذوبان المسرعة المقدر بـ 14 دورة، لعينات قصدية مكونة من ثلاثة أنواع من الحجارة التي استخدمت بشكل كبير في الموقع الأثري، وذات خصائص مختلفة، ثم تحليل مختلف النتائج عبر مقارنة التغيرات في خواص الحجارة والمتمثلة في:

-التغيرات في الوزن، وفي الكثافة، وفي المسامية، وفي معامل امتصاص الماء؛

-التغيرات في سرعة الموجة فوق الصوتية  $V_p$ ؛ وفي مؤشر الإستمرارية، وفي مقاومة الضغط أحادي المحور  $R_c$ .

ثم دراسة وتحليل المعلومات الميدانية والمخبرية والخروج بنتائج تفيد في اقتراح حلول وتوصيات تساهم في الحفاظ على هذا التراث.

ولقد استعنا في هذه الدراسة بمصادر ومراجع عربية وأجنبية متخصصة في موضوع البحث، رغم من قلة المصادر والمراجع التاريخية فقد أفادتنا بمعلومات حول تاريخ المنطقة والموقع الأثري، ومعرفة اسمه ومؤسسه، وأهم معالمه منها:

- **عبد الرحمان الجيلالي**، تاريخ الجزائر العام، الجزء الأول، دار مكتبة الحياة، بيروت 1965.  
**حارش محمد الهادي**، التاريخ المغربي القديم (السياسي والحضاري منذ فجر التاريخ إلى الفتح الإسلامي)، المؤسسة الجزائرية للطباعة، الجزائر 1995 م، ص 214.

- **Allais, Yvonne**, Djemila, Algérie, 1938.

- **Février Paul-Albert**, Djemila, direction des arts, musées, monuments historique, antiquités. Alger ,2<sup>eme</sup> édition, 1978.

- **Gsell Stéphane**, les monuments antiques de l'Algérie, T1, Paris, 1901.

- **Michèle Blanchard-lamée**, Maisons à mosaïques du quartier central de Djemila ,Aix-en-Provence, 1975.

أما المراجع العلمية فهي قليلة فمعظمها باللغات الأجنبية، منها:

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

## مقدمة

-**Kevin Beck**, étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité, thèse de doctorat en sciences des Matériaux, université d'Orléans, France, 2006.

-**Marion Bost**, 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, 2008.

-**Saad Alice**, influence du changement climatique et des conditions extrêmes sur les massifs fractures, rôle des fluides dans leur processus d'altération, thèse de doctorat Géotechnique, université Paris-Est, 2011.

### الدراسات السابقة:

فيما يتعلق بالدراسات السابقة التي تناولت موضوع الموقع الأثري لجميلة، من نفس الجانب الذي تناولته هذه الدراسة، (تلف حجارة الموقع الأثري بفعل الجليد)، فهي منعدمة، غير أن أغلب الدراسات التي تناولت جميلة تمثلت في تقارير من طرف الباحثين الفرنسيين، والتي اعتبرت أهم المرجعيات التي ارتكزت عليها العديد من الدراسات خاصة في الجانب التاريخي والأثري، أما الدراسات والأبحاث الجامعية فأغلبها اهتمت بالجانب التاريخي والأثري والعمراني، ولم تهتم بالدرجة الأولى بعوامل التلف، من بينها:

-**Zidane Miloud**, Djemila et Sétif : l'urbanisme compare de deux villes romaines d'afrique du nord, thèse de doctorat : histoire : université paris, France, 1998.

- **أونيس ميلود**، " تيجان مدينة جميلة كويكول" دراسة حول الزخرفة المعمارية"، رسالة ماجستير، تخصص آثار قديمة، جامعة الجزائر 02، 2004.

- **طواهي حكيم** " منازل ذات الفنائين بإقليم نوميديا: دراسة لمنازل تيمقاد، جميلة، عنونة وخميسه"، رسالة ماجستير آثار قديمة، جامعة الجزائر 02، 2004.

- **محد أكلي إخربان**، جرد التحف المعروضة بمتحف جميلة (كويكول القديمة)، رسالة ماجستير آثار قديمة، جامعة الجزائر 2، 2008.

- **حجاج كهينة**، طرق تموين مدينة كويكول (جميلة) بالمياه في العهد الروماني (دراسة وصفية معمارية)، رسالة ماجستير آثار قديمة، جامعة الجزائر 2، 2010.

## مقدمة

أما التي تناولت مواد بناء الموقع الأثري وعوامل تلفها فقليلة وليست معمقة وذات علاقة مباشرة بموضوع بحثنا أي التي تتعلق بالجليد وحتى إن ورد في بعض الدراسات تكون الإشارة له وجيزة جداً لا تسمح بالتعرف عليه، ومن أبرزها:

**-Dessandier David, 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.

- عيساوي بوعكاز، طرق حفظ وصيانة مواد بناء الموقع الأثري جميلة" كويكول" حالة الحجارة الكلسية، رسالة ماجستير في الصيانة والترميم، جامعة الجزائر، 2009.

وسعيّاً لتحقيق أهداف الدراسة، وبالاعتماد على المنهجية المتبعة، قسمنا البحث وفق ما يقتضي الموضوع إلى مقدمة وخمسة فصول وخاتمة.

**المقدمة:** شملت التعريف بالموضوع، وأهميته، وأهداف الدراسة، ثم التطرق إلى إشكالية البحث، والمنهجية المتبعة في معالجة الموضوع وأقسامه.

**الفصل الأول:** مدخل عام للموضوع، عبارة عن عموميات حول المنطقة والموقع الأثري، تناولنا الإطار الجغرافي والتاريخي للموقع الأثري، أبرزنا من خلاله الموقع الجغرافي، تضاريس المنطقة، البنية الجيولوجية والمعطيات المناخية للمنطقة، كما تطرقنا للجانب التاريخي للموقع الأثري، وأهم معالمه.

**الفصل الثاني:** تناولنا فيه مواد بناء الموقع الأثري، قدمنا خلاله مفاهيم عامة حول الصخور، وأنواعها الرئيسية وأهم خصائصها، بعدها تطرقنا لأهم مواد البناء الحجرية المستخدمة في الموقع الأثري، والتي قسمناها لحجارة البناء، وحجارة التزيين، ثم تطرقنا لمصادرها التي جلبت منها، وإلى تقنيات بناء مباني كويكول، بالاعتماد على الدراسة الميدانية وبعض المراجع.

**الفصل الثالث:** خُصص لتشخيص أهم عوامل التلف المتسببة في تدهور حجارة الموقع الأثري، والتي قسمناها إلى عوامل داخلية، تتمثل في تأثير الخواص الجوهرية للحجارة، وعوامل خارجية تتمثل في العوامل الطبيعية والمناخية، والبيولوجية والبشرية، كما

## مقدمة

عرضنا أهم مظاهر تلف حجارة الموقع الأثري وذلك لتوثيق حالة حفظ الحجارة، والتي شخصناها في التقشر والتشريح، والتشقق، والتجوف، والتصدع، والإتفصال الحبيبي، والتي تدل على فقدان الحجارة لصلابتها ومتانتها.

**الفصل الرابع:** خصص للتعريف بآلية تلف الحجارة تحت فعل الجليد، مركزين على آليات التلف التي يحدثها ومظاهر تدهوره، وأهم العوامل المؤثرة فيه، ثم استعرضنا أهم المناهج التجريبية التي اتبعت من طرف مختلف الباحثين بغرض دراسة تأثير دورات التجمد والذوبان على الحجارة، وأهم الأساليب المتبعة لتقييم استدامة الحجارة للجليد.

**الفصل الخامس:** يتضمن العمل التطبيقي (الجانب المخبري والميداني)، حيث قمنا من خلاله بتقديم عينات الدراسة، ووصف التجارب والإختبارات المخبرية المتبعة لتحديد الخواص البيتروفيزيائية للحجارة، من تركيب كيميائي ومعدني، وخواص فيزيائية وميكانيكية، ووصف برتوكول الشبخوخة الإصطناعية عن طريق دورات التجمد والذوبان، ثم عرض وتحليل ومناقشة نتائج العمل الميداني والمخبري الذي قمنا به على عينات الدراسة قبل وبعد دورات التجمد والذوبان لمعرفة وتقدير التغيرات التي حدثت للخصائص الفيزيوميكانيكية لهذه العينات.

وفي نهاية البحث وضعنا خاتمة ذكرنا فيها أهم النتائج التي تحصلنا عليها، وأهم الإقتراحات والتوصيات للوقاية من خطر الجليد، ولم نعتمد في هذا البحث على الوسائل ذات تكنولوجيا عالية في تقييم تأثير الجليد على الحجارة لصعوبة الحصول عليها.

ولا يخلو أي بحث من عقبات وصعوبات، ومن أبرز الصعوبات التي واجهتنا، نقص المصادر والمراجع التي تناولت موضوع تأثير الجليد على الحجارة باللغة العربية، ناهيك عن مشكلة ترجمة المصطلحات العلمية إلى اللغة العربية، خاصة التي تتناول عوامل ومظاهر تلف الحجارة، وكذا المتعلقة بآليات تلف الحجارة بفعل الجليد.

بالإضافة إلى صعوبة الوصول إلى عينات الدراسة نتيجة عدم تمكننا من الحصول على الترخيص الذي يسمح لنا بأخذ عينات من الموقع الأثري من طرف الهيئة المسؤولة "الديوان الوطني لتسيير واستغلال الممتلكات الثقافية المحمية".



# الفصل الأول: الإطار الجغرافي والتاريخي

---

## الفصل الأول:

## الإطار الجغرافي والتاريخي

# الفصل الأول: الإطار الجغرافي والتاريخي

للتعريف بمنطقة الدراسة ارتينا أنّ نخصص في هذا الفصل جانبيين، الأول نقدم فيه الإطار الجغرافي للموقع الأثري، تضاريس والبنية الجيولوجية التي أثرت بشكل كبير في تكوينها الصخري، وبالتالي في طبيعة الحجارة المستخدمة في بناء معالم هذا الموقع الأثري، ثم طبيعة المناخ الذي تتميز به المنطقة والذي يفسر سبب تدهور حجارة المشكلة لمعالم هذا الموقع الأثري، أما في الجانب الثاني فنقدم فيه لمحة تاريخية عن الموقع الأثري وأهم المعالم التي يتكون منها هذا الموقع، والتي تبرر أهمية الحفاظ عليه.

## I- الإطار الجغرافي والمناخي

نقدم فيما يلي الإطار الجغرافي الذي نبرز فيه الموقع الجغرافي للموقع، تضاريس المنطقة، الشبكة المائية، البنية الجيولوجية، أما في المناخ فنبرز من خلال أهم مميزات به المنطقة من تساقط الأمطار والثلوج، الى جانب طبيعة الرياح السائدة، والحرارة والرطوبة، وتشكل الجليد.

### I-1- الإطار الجغرافي

تتفرد منطقة جميلة بإطار جغرافي هام يميزها عن مناطق الوطن يتمثل فيما يلي:

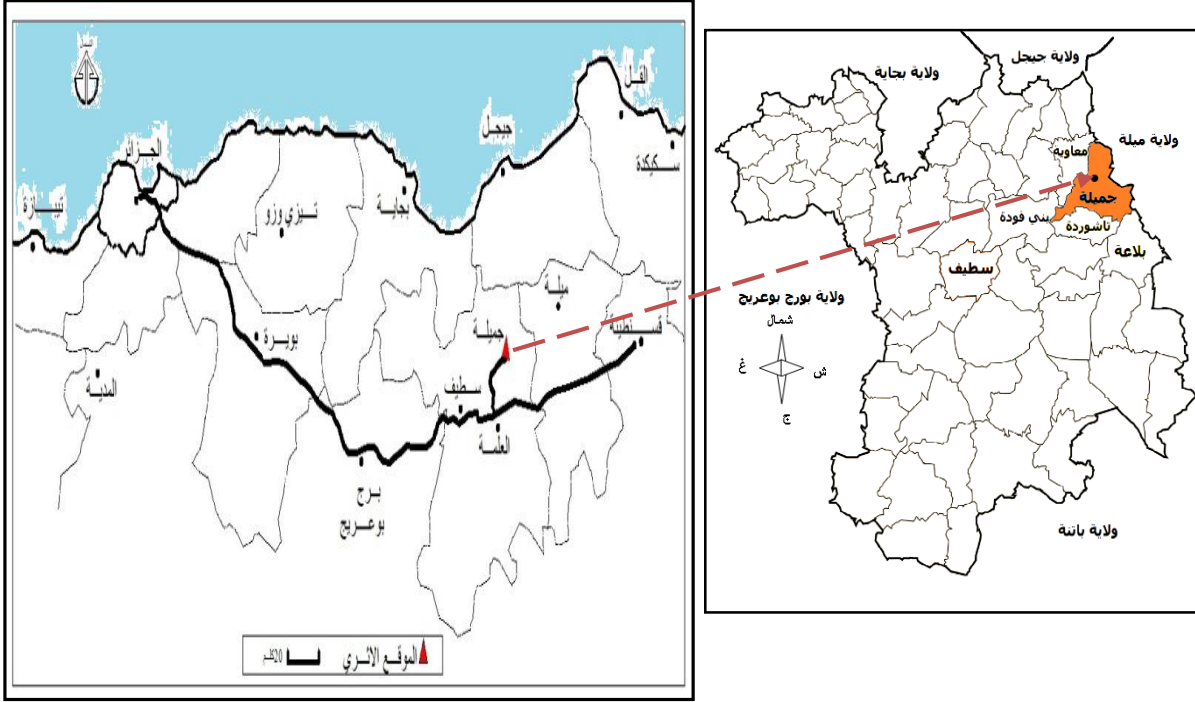
#### I-1-1- الموقع الجغرافي

تنحصر جميلة بين دائرتي عرض 36° جنوباً و 11° شمالاً، وبين خطي طول 15° غرباً، و 15° شرقاً، أما من الناحية الجغرافية فتقع في شمال شرق الجزائر، في الجناح الشرقي من ولاية سطيف عاصمة الهضاب العليا (الخريطة رقم 1)، تبعد عنها بمسافة 43 كلم، بينما تبعد عن الجزائر العاصمة بحوالي 345 كلم<sup>(1)</sup>.

يحد إقليم جميلة من الشمال كل من بلدية معاوية و ولاية ميلة، ومن الجنوب كل من بلدية البلاعة وبلدية تاشودة، ويحدها شرقاً ولاية ميلة، ومن الغرب لديها حدود مشتركة مع كل من بلدية بني فوده وبلدية معاوية.

(1) -Centre d'études et de réalisations en urbanisme SPA, Révisions le plan directeur d'aménagement et d'urbanisme de la commune du Djemila, phase finale ,URBAB, Sétif ,2010, p12.

# الفصل الأول: الإطار الجغرافي والتاريخي



الخريطة رقم 1: الموقع الجغرافي لمدينة جميلة (1)

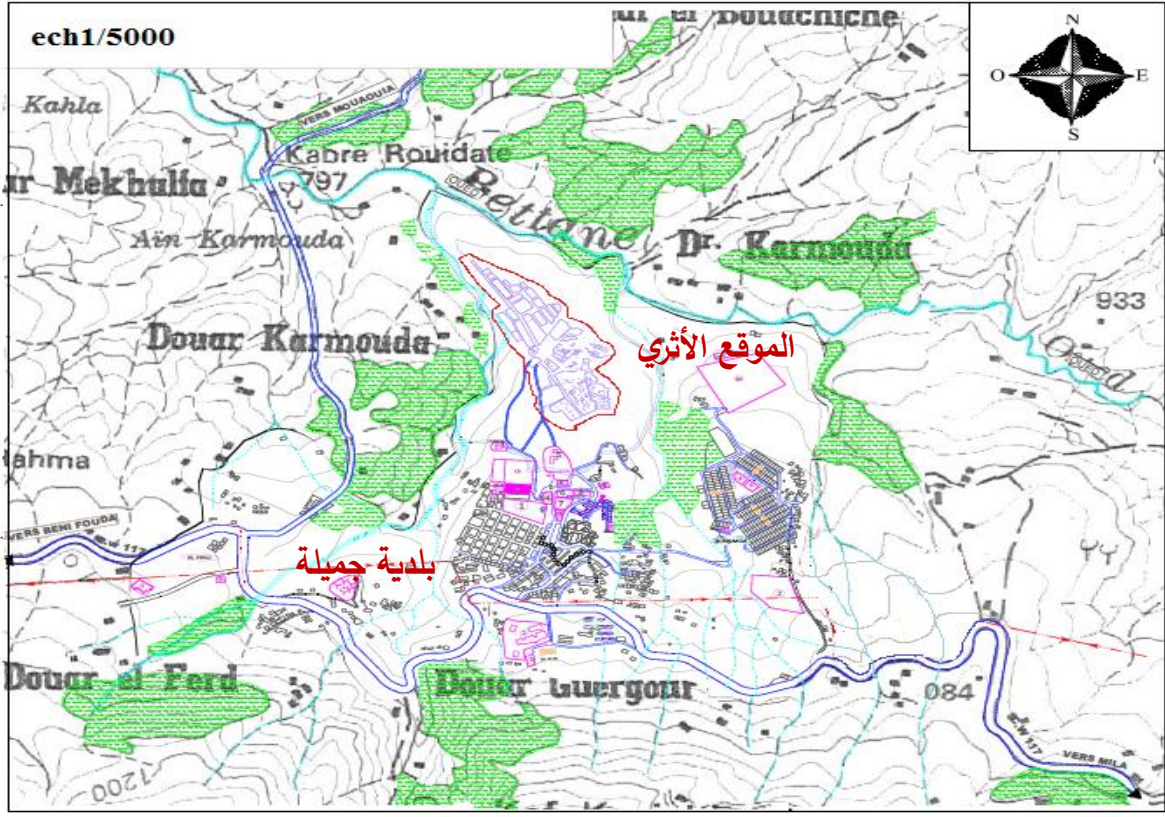
المدينة الأثرية لجميلة تقع على هضبة صخرية محصورة بين واد بيطام من الجهة الشرقية وواد قرقر من الجهة الغربية في منظر طبيعي جبلي يتراوح ارتفاعه بين (800 و1000م)، فضلاً عن ذلك، فقد شيدت على مفترق طرق لمسارين رئيسيين بين قسنطينة وسطيف، ولامبار (باتنة)، وجيجل (2).

تتربع هذه المدينة على مساحة تقدر بحوالي 42 هكتار، مخططها على شكل شريط مثلث، تمثل قاعدته الحدّ الجنوبي من المحيط العمراني، بارتفاع يبلغ حوالي 900م، في حين جانبه الشرقي يحده واد بيطام، أما الجانب الغربي فيحده واد قرقر، لكن رأسه في الجزء الشمالي بارتفاع 780م (الخريطة رقم 2)، ذات أرضية غير مستوية، بميل يقدر أكثر من 20%، هذه الوضعية سمحت بتحديد الإتجاه العام للمنحدر جنوب شمال، والتي ترجمت معنى توسع المدينة من أسفل نحو الأعلى.

(1) -<https://www.scribblemaps.com/create/#/lat=36.52410313350053&lng=5.221504041729759&z=9&t=customstyle>. (Adaptée et modifiée).

(2) -Duval Noël, Djemila, Encyclopédie Berbère, Djalut – Dougga, Volumes16, 1995, pp2442-2449

# الفصل الأول: الإطار الجغرافي والتاريخي



الخريطة رقم 2: الموقع الأثري لجميلة (1)

## 2-1-I- تضاريس المنطقة

لا شك أن طبيعة تضاريس هذه المنطقة لها تأثير كبير على مناخها، إذ جعلتها تتميز ببيئة شبه قاسية، يظهر ذلك في الإرتفاع والانخفاض في درجات الحرارة، وتساقط الأمطار والتلوج، وتشكل الجليد، فضلاً عن ذلك، هذه التضاريس ساهمت بشكل كبير في تكوين شبكة من الأودية، والتي شكلت عاملاً مهماً في جذب وتحفيز الإستقرار البشري منذ القدم وحتى يومنا هذا.

وبالنظر إلى تضاريس منطقة جميلة بشكل عام، يمكن القول بأنه يغلب عليها الطابع الجبلي بارتفاعات تتعدى أحياناً 1200م فوق سطح البحر (2) كما يظهر

(1) -Centre d'étude et de réalisations en urbanisme SPA (URBAB-Sétif-) , plan occupation des sols de la commune du Djemila, phase 3, Sétif, 2014.( Adaptée et modifie).

(2)-Centre d'études et de réalisations en urbanisme spa (URBAB-SETIF), Révisions le plan directeur d'aménagement et d'urbanisme de la commune du Djemila, op.cit., pp12,13.

## الفصل الأول: الإطار الجغرافي والتاريخي

في الخريطة (رقم3)، وميل يتجاوز 25 %، وقد قسمت هذه التضاريس وفق ارتفاعها إلى أربعة مناطق رئيسية (1):

- مناطق ذات ارتفاعات منخفضة تتراوح بين 500 إلى 700م، تتمركز في الشمال الشرقي والشمال الغربي.
- مناطق متوسطة الارتفاع تتراوح من 700 إلى 900م فوق سطح البحر، محصورة بين واد بيطام، وواد الخروبة، وواد بولشون، والتي تتواجد فيها المدينة الأثرية.
- منطقة تتألف من جبال ذات ارتفاع يتراوح من 900 إلى 1100م فوق سطح البحر، تتمركز في الشمال الشرقي.
- مناطق تمثل امتداداً لسفوح الجبال ذات ارتفاع يتعدى 1100 م فوق سطح البحر، وميل يفوق 25%.

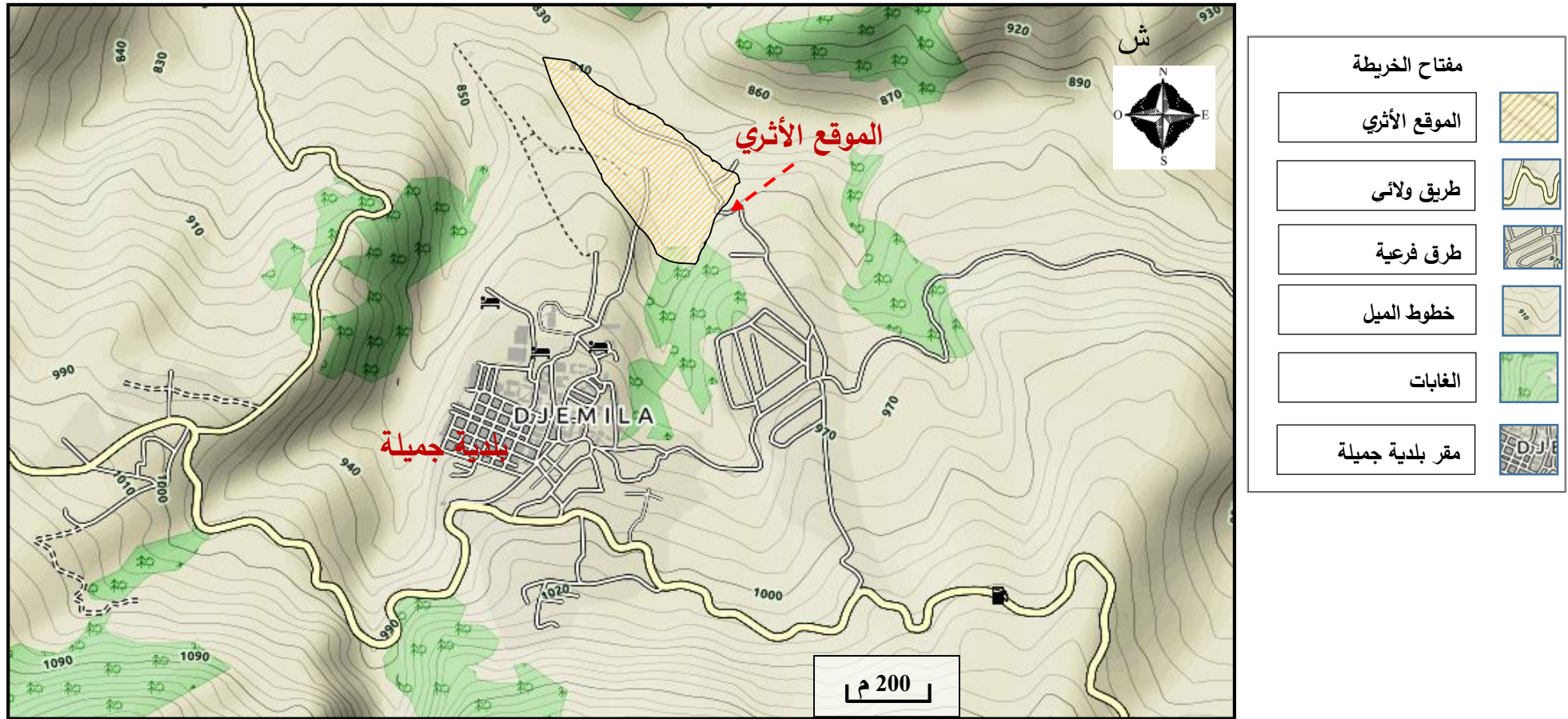
مما سبق نستخلص أنّ منطقة جميلة عبارة عن هضبة تطل على الوديان، حيث طوبوغرافيتها عبارة عن أرضية غير مستوية منحدره بميل يتعدى 25%، ويتراوح متوسط ارتفاعها من 500 إلى 1100م، وأحياناً يتعدى 1200م فوق سطح البحر، أما الموقع الأثري لجميلة فيقع في منطقة غير مستوية ذات ارتفاع يتراوح بين 700 و900م، وبميل يتعدى 20% باتجاه شمال جنوب.

فضلاً عن ذلك، فطوبوغرافية المنطقة لعبت من جهة، دوراً كبيراً في عملية توسع المدينة، من الشمال نحو الجنوب، وتحديد ميل الشوارع واتجاهاتها، وطريقة البناء، ومن جهة أخرى شكلت عامل يهدد استقرار المباني نتيجة مساهمتها في تشكّل السيول في ظل غياب أنظمة لصرف مياه الأمطار والحماية من السيول.

(1)-Ibid, pp12,13.



## الفصل الأول: الإطار الجغرافي والتاريخي



الخريطة رقم 3: تضاريس منطقة جميلة (1)

(1) -<https://www.viamichelin.fr/web/Hotels?geoboundaries=36.304958,5.7160664:36.3254639,5.7594967>. (adaptée et modifiée).

### I-1-3- الشبكة المائية

لاشك أنّ الطابع الجبلي لمنطقة جويلية منحها ثروة مائية هامة، عبارة عن خزانات باطنية ومجموعة من الأودية، من أهمها واد قرقر الذي ينبع من الجنوب الغربي، وواد بيطام الذي ينبع من الجنوب الشرقي، أما من الشرق فينبع كل من واد بوزالغ وواد بولشون اللذين يصبان في واد الخروبة<sup>(1)</sup>، هذا ما أهلها لتكون مقراً للنشاط والإستقرار البشري منذ العصور القديمة، نظراً لتوفرها على مصادر للمياه، والدليل على ذلك وجود الموقع الأثري محصوراً بين ضفتي واد بيطام من الشرق و واد قرقر من الغرب، بالإضافة إلى ذلك فقد بينت الأبحاث الأثرية عن وجود قنوات لتحويل المياه إلى الموقع الأثري، فضلاً عن استغلالها في شتى مناحي الحياة القديمة (الحمامات، النافورات، العيون، الآبار، الزراعة،...)، ومن جهة أخرى تواجد الموقع الأثري بالقرب من الأودية جعله تحت ظروف مناخية عززت من تأثير ارتفاع الرطوبة والأملاح والمياه الأرضية، إلى جانب توفيرها لبيئة ملائمة لنمو النباتات، الحيوانات والحشرات والكائنات الدقيقة.

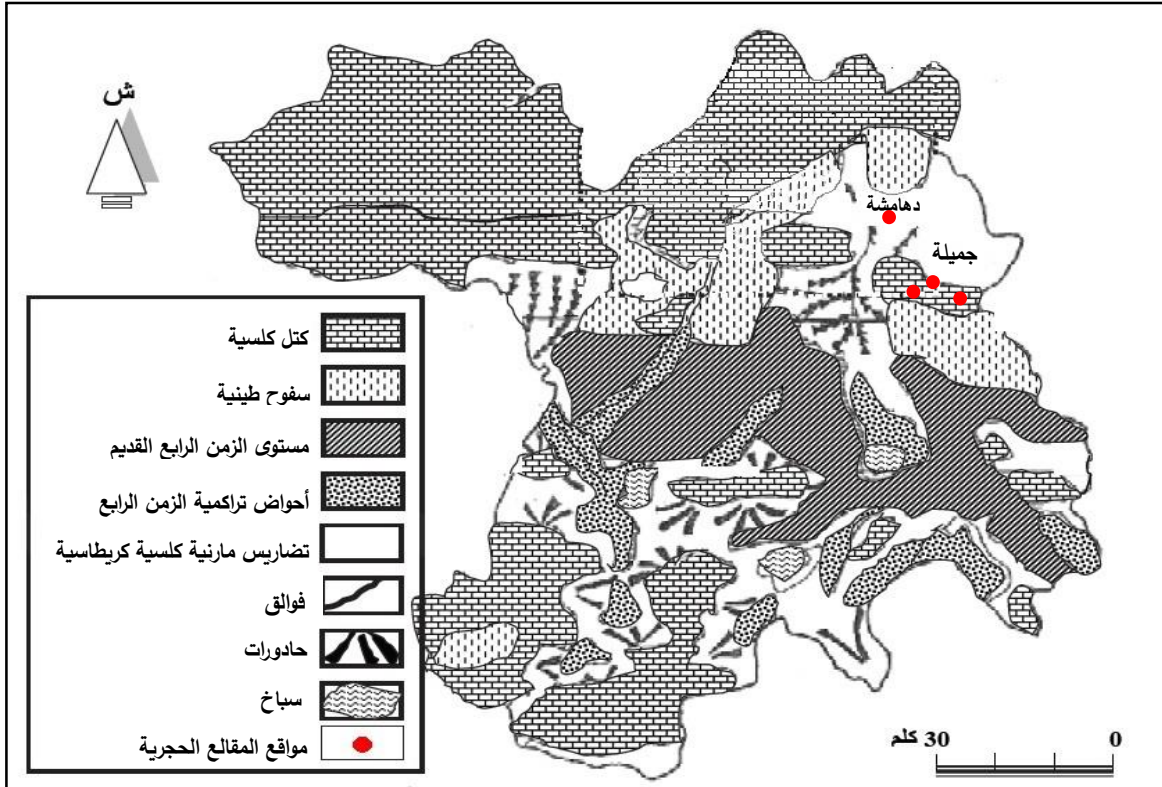
### I-1-4- البنية الجيولوجية

تعتبر هضبة جميلة جزءاً لا يتجزأ من منطقة سطيف، لذا فالحديث عن طابعها الجيولوجي لا ينفصل عن جيولوجية منطقة سطيف، وعليه منطقة جميلة تتشكّل بشكل عام من مجموعة من الجبال، عبارة عن قبة جيولوجية ممتدة نتيجة للحركات التكتونية التي تعرضت لها عبر تاريخها الطويل، وهذه الهضبة هي عبارة عن تكوينات صخرية متنوعة ومتداخلة ذات منشأ رسوبي على شكل طبقات أفقية، وهي تتكون بشكل عام من صخور الدولوميت، والكلس الكتلي والسيليسي، وترجع الدراسات الجيولوجية أنها تشكّلت خلال حقبة الميوسان والميوليبوسان من الزمن الثالث، كما تتميز أيضاً بوجود تكوينات أقل صلابة على شكل طبقات تمتد عبر مساحات واسعة، عبارة عن الكلس المارني من حقبة الإيوسان<sup>(2)</sup>، هذه التكوينات الجيولوجية جعلت المنطقة غنية بمقالع هامة لهذه الحجارة، بعضها منتشرة

(1) -Centre d'études et de réalisations en urbanisme spa (URBAB-SETIF), Révisions le plan directeur d'aménagement et d'urbanisme de la commune du Djemila, op.cit, p74.

(2) -عاطف صالح، وضع خطة تنموية ضمن أبعادها البيئية بولاية سطيف، رسالة ماجستير غير منشورة، جامعة قسنطينة، 2005، ص12.

حول محيط الموقع الأثري لجميلة، والتي استغلت منذ القدم في مجال البناء، وهذا ما دلت عليه العديد من آثار الإستخراج التي عثر عليها في العديد من المقالع الحجرية، من أهمها مقالع متواجد في كل من جبل جميلة، وجبل سيدي سعدون، وكاف بن صالح، وجبل دهامشة، كما يظهر في الخريطة رقم(4) التي تبين البنية الجيولوجية للمنطقة مع أهم المحاجر خاصة تلك القريبة من الموقع الأثري التي تتواجد فيها الحجارة الكلسية.



الخريطة رقم 4: تبين البنية الجيولوجية لولاية سطيف (منطقة جميلة) (عن منصور هجرس بتصريف) (1)

## I-2- المناخ

يسود منطقة جميلة مناخ شبه قاري، حار وجاف صيفاً، بارد وممطر شتاءً، فحسب معطيات الديوان الوطني للأرصاد الجوية(2)، فقد قدر معدل التساقط السنوي للأمطار بين 400 و500 ملم، أما متوسط درجة الحرارة الدنيا في فصل الشتاء فهو أدنى من 2°م،

(1)- منصور هجرس، إشكالية التخلف وجهود التنمية في البلديات الجبلية الشمالية لولاية سطيف حالة بلديات (عين

الكبيرة، دهامشة، أولاد عدوان، عموشة، تيزي نيبشار، وإد الباردي)، رسالة ماجستير، جامعة قسنطينة، 2008، ص19.

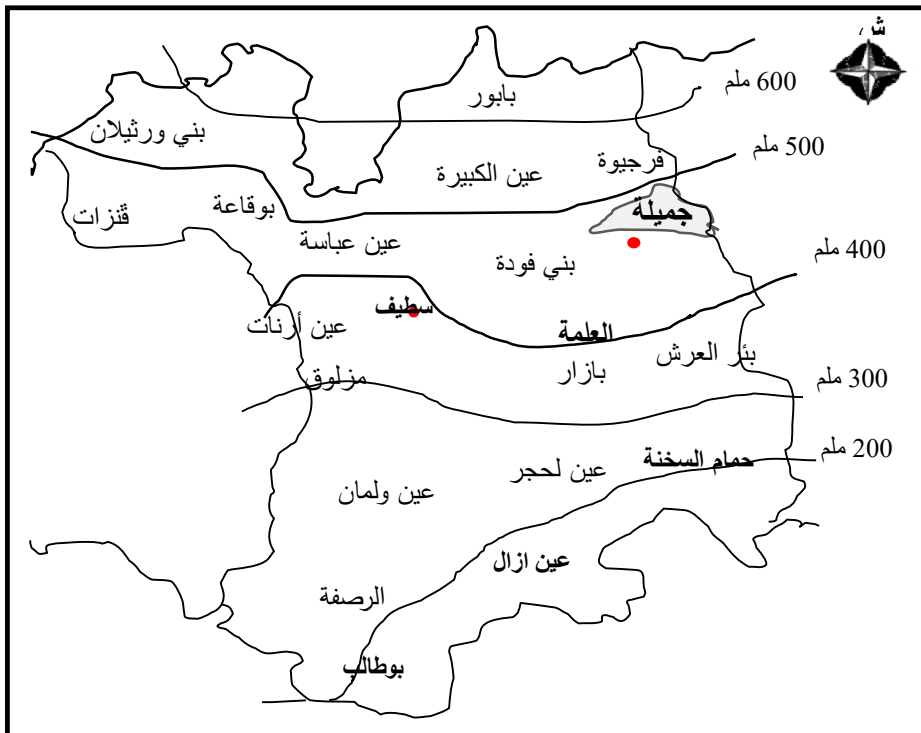
(2)- الديوان الوطني للأرصاد الجوية بالجزائر، معطيات المناخية لمنطقة جميلة للفترة الممتدة بين 1996 إلى 2008 م



في حين متوسط درجة الحرارة القصوى صيفاً قد يصل إلى 35°م، كما تهب على المنطقة رياح موسمية شمالية شرقية، وأحياناً جنوبية تعرف بالسّيروكو، والتي تكون محملة بالرّمال والأترية، أما الرطوبة النسبية فهي مرتفعة خاصة في فصل الشتاء، إذ تتراوح نسبتها بين 73 و85%، كما تتميز المنطقة أيضاً بتعرضها لتشكل الجليد خاصةً في فصلي الشتاء والربيع، هذا الاختلاف في المناخ فرضته عدة عوامل، أهمها الإرتفاع عن سطح البحر من 500م إلى 1200م، و وقوعها في سلسلة الأطلس التلي، وتعرضها للرياح وللتيارات الهوائية الغربية.

### I-2-1- تساقط الأمطار

يُعد تساقط الأمطار من أهم العناصر المناخية، وهو يختلف من فصل لآخر، ومن عام لأخرى، وبما أن جميلة تدخل ضمن المجال الشمالي لولاية سطيف كما هو موضح في الخريطة رقم 5، فهي تعرف تساقط للأمطار بمعدل سنوي يتراوح من 400 ملم إلى 500 ملم، ويمكن تلخيص تساقط الأمطار لمنطقة جميلة للفترة الممتدة من 1996 م إلى 2008 م في الجدول رقم 1.



الخريطة رقم 5: تبين توزيع الأمطار لولاية سطيف (منطقة جميلة) (1)

## الفصل الأول: الإطار الجغرافي والتاريخي

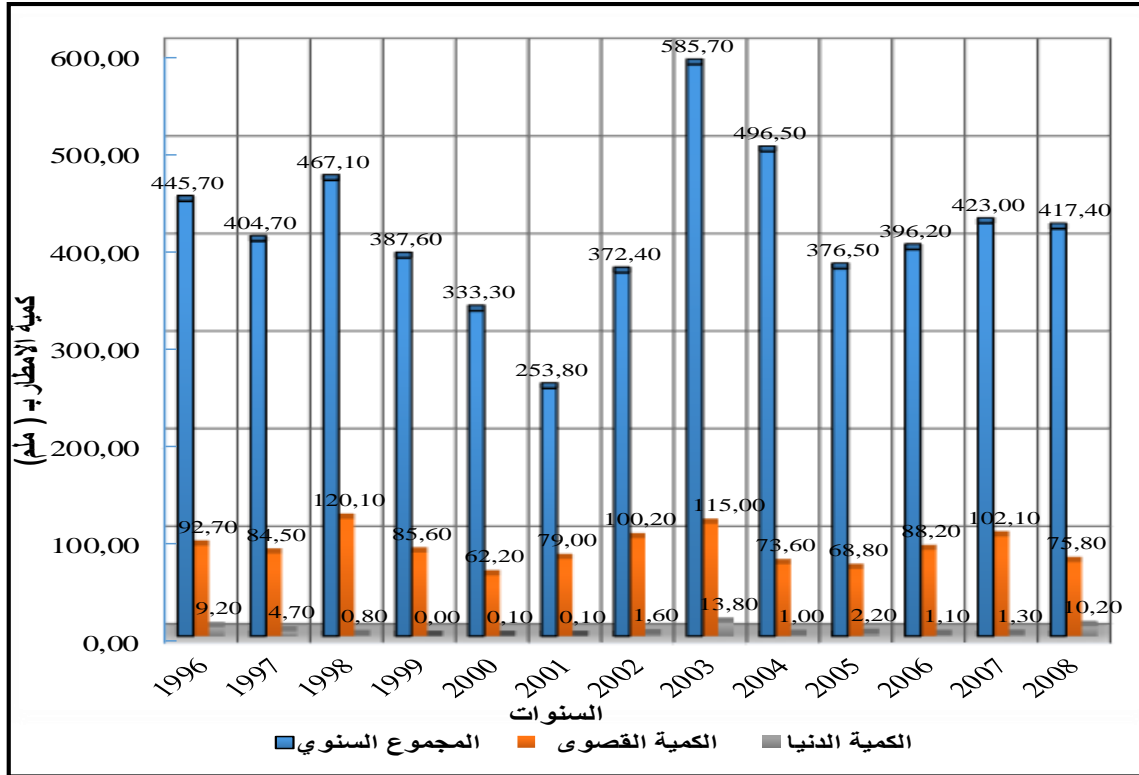
المجموع السنوي	الفصل / الأشهر												السنوات
	الخريف			الصيف			الربيع			الشتاء			
	نوفمبر	أكتوبر	سبتمبر	أوت	جويلية	جون	ماي	أفريل	مارس	فيفري	جانفي	ديسمبر	
445,70	10,80	09,2	019,2	018,5	9,20	23,00	69,30	53,10	48,20	92,70	62,30	30,20	<b>1996</b>
404,70	69,70	045,3	084,5	026,2	010,5	020,8	020,8	037,7	4,70	7,80	32,80	43,90	<b>1997</b>
467,10	57,90	17,00	0120,1	12,00	0,80	19,40	101,50	52,00	13,40	39,70	10,00	23,30	<b>1998</b>
387,60	24,20	50,10	85,60	5,50	0,00	25,70	4,40	8,80	19,50	16,30	65,60	81,90	<b>1999</b>
333,30	15,40	47,60	39,70	24,00	0,10	20,30	62,20	28,80	21,70	5,90	6,10	61,50	<b>2000</b>
253,80	37,40	14,70	47,40	4,40	0,20	0,10	19,50	13,30	9,00	20,30	79,00	8,50	<b>2001</b>
372,40	100,20	10,20	4,30	34,00	44,40	1,60	24,30	9,00	29,80	24,10	23,00	67,50	<b>2002</b>
585,70	14,40	69,20	30,50	22,40	13,80	59,60	43,80	63,30	37,60	29,3	115,00	86,80	<b>2003</b>
496,50	50,30	37,40	17,90	33,00	1,00	17,00	73,60	69,00	34,30	18,80	42,70	101,50	<b>2004</b>
376,50	68,80	23,00	27,10	8,80	20,40	36,20	2,20	50,70	18,50	40,10	28,20	52,50	<b>2005</b>
396,20	9,20	1,10	52,20	3,50	37,90	7,70	88,20	42,60	9,80	37,10	61,80	45,10	<b>2006</b>
423,00	16,80	25,40	79,70	1,30	7,60	30,30	28,50	88,80	102,10	25,10	10,30	7,10	<b>2007</b>
417,40	27,10	42,0	45,00	19,80	54,90	15,70	75,80	21,30	49,00	19,30	10,20	37,30	<b>2008</b>
412,30	38,63	30,17	50,25	16,42	15,45	21,34	47,24	41,42	30,58	28,96	42,08	49,78	<b>المعدل</b>

الجدول رقم 1: يبين التساقط السنوي للأمطار بالمليمترا لمنطقة جميلة للفترة الممتدة من 1996 إلى 2008 (عن الديوان الوطني للأرصاد الجوية بتصريف)<sup>(1)</sup>

(1) - الديوان الوطني للأرصاد الجوية، احصائيات تساقط الأمطار للفترة الممتدة بين 1996 إلى 2008 م.

يتضح من هذه البيانات أنّ الفترة الممطرة تبدأ من فصل الخريف وتستمر حتى فصل الربيع، كما تشهد المنطقة أيضاً تشكّل خلايا للأمطار الرعدية خلال فصل الصيف، مما يعزز تشبع الحجارة مما يعرضها للتشقق والتّشخ والتّزهر، وقد سجل أعلى مستوى للتساقط في كل من شهر ديسمبر، جانفي وأفريل، أما أدنى مستوى فقد سجل في شهري جويلية وأوت، في حين المعدل السنوي للتساقط قدر بـ 412,30 ملم، وقد مكّنا الجدول رقم (1) من إعداد الشكل رقم(1) الذي يبين كمية الأمطار القصوى والدنيا للسنوات الممتدة من 1996 إلى 2008 م، والذي يتضح من خلاله أنّ أكبر كمية للأمطار السنوية سجلت سنة 2003 بـ 585,70 ملم، في حين أدنى كمية سجلت سنة 2001 بمقدار 253,80 ملم.

نستنتج مما سبق أنّ منطقة جميلة تتميز بتساقط غير منتظم، إذ تعد فترة الصيف جافة جداً، أما فصلي الربيع والخريف فيكونان ممطران نوعاً ما، وهذا ما يحفز تشرب الهياكل بالماء، لكن فصل الشتاء يكون ممطراً ومثلجاً وبارداً جداً، مما يعرض المحتوى المائي لمواد البناء المتشعبة بمياه الأمطار للتجمد، وبذلك يتعزز الفعل الإتلافي للجليد.



الشكل رقم 1: يوضح كمية الأمطار المتساقطة لمنطقة جميلة للفترة الممتدة

من 2008 - 1996

## I-2-2 - الرياح

تختلف سرعة واتجاه ومدة الرياح من منطقة إلى أخرى، ومن فصل لآخر، أما تأثيرها فيزداد عند اشتراكها مع عوامل أخرى، كالأمطار والرطوبة، مما يحفز ويسرع من وتيرة التدهور لحجارة المباني خاصة الأثرية منها، وهذا ما لاحظناه على حجارة هياكل الموقع الأثري لجميلة، وعموماً يمكن تقسيم الرياح التي تهب على جميلة إلى رياح شمالية غربية خاصة بفصل الشتاء، تتميز بشدتها الكبيرة، كما تكون محملة بالرطوبة، إلى جانب رياح شمالية شرقية، تساهم بشكل كبير في تعزيز تساقط الأمطار والثلوج، ناهيك عن خفض درجة الحرارة إلى النقطة التي تحفز تشكّل الجليد خاصة في فصلي الشتاء والربيع، أما في فصل الصيف فتعمل على تلطيف الجو، بالإضافة لهبوب رياح غربية جنوبية تكون جافة وحارة تعرف بالسيروكو<sup>(1)</sup>، يبدأ هبوبها من شهر ماي إلى أوت، تكون محملة بالملوثات من غبار وأتربة<sup>(2)</sup>، تعمل على جلب الملوثات، رفع درجة حرارة الجو، مما يساهم في تسريع تبخر المحتوى المائي لمواد البناء وتحفيز تشققها، أما شتاءً فتلعب دوراً في تلطيف الجو<sup>(3)</sup>.

وحسب معطيات الديوان الوطني للأرصاد الجوية لجميلة الخاص بالرياح للفترة الممتدة من 1996 إلى 2008 المبينة في الجدول رقم (2)، والذي يتضح منه أنّ الرياح تهب على مدار السنة لكن بشدّة مختلفة، تبلغ أقصى سرعة لها في فصل الشتاء بـ 4,3 م/ثا في شهر فيفري، بينما في الفصول الأخرى (الربيع، والصيف، والخريف) فتتراوح بين 2,7 إلى 3,4 م/ثا، وأحياناً تبلغ 4,4 م/ثا في شهر جويلية (رياح السيروكو)، وللتوضيح أكثر، ترجمنا معطيات هذا الجدول في شكل منحنى بياني ممثل في الشكل رقم (2)، والذي يتضح منه أنّ أقصى معدل سنوي لشدة الرياح كان سنة 2002 بـ 3,30 م/ثا، في حين أدنى قيمة له سجلت سنة 1998 بمقدار يقدر بـ 2,6 م/ثا<sup>(4)</sup>.

(1) - منصور هجرس، مرجع سابق، ص 25.

(2) - فتحي محمد أبو عيانة، فتحي عبد العزيز أبو راضي، أسس علم الجغرافيا الطبيعية والبشرية، دار المعرفة الجامعية، 1999، ص 195.

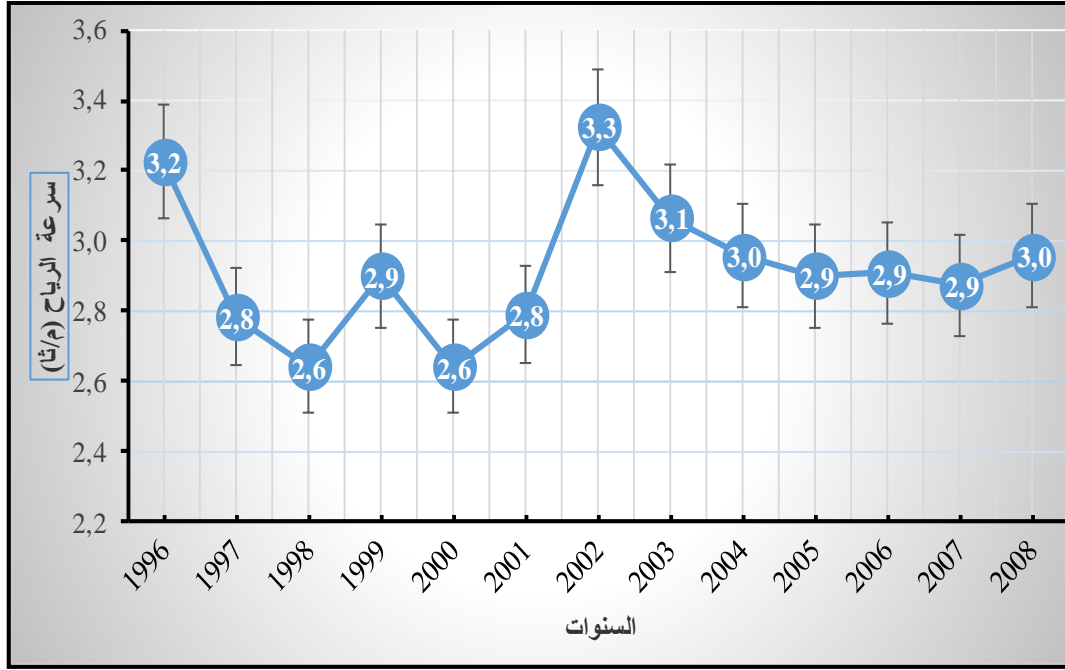
(3) - نبيل سليمان، تصميم وتنفيذ مشروع نظام معلومات جغرافي لتسيير المجال في ولاية سطيف، رسالة ماجستير، جامعة قسنطينة، 2009، ص 24.

(4) - الديوان الوطني للأرصاد الجوية، معطيات الرياح لمنطقة جميلة للفترة الممتدة من سنة 1996 إلى 2008 م.

## الفصل الأول: الإطار الجغرافي والتاريخي

المعدل السنوي	الفصل / الأشهر												السنوات
	الخريف			الصيف			الربيع			الشتاء			
	نوفمبر	أكتوبر	سبتمبر	أوت	جويلية	جوان	ماي	أفريل	مارس	فيفري	جانفي	ديسمبر	
3,20	3,40	2,90	3,30	2,70	3,30	2,90	3,40	2,80	2,60	4,30	3,30	3,80	<b>1996</b>
2,80	3,70	2,20	2,30	3,10	3,00	2,40	2,80	3,00	3,20	1,90	3,00	2,80	<b>1997</b>
2,70	2,70	2,00	2,60	3,10	3,60	2,60	2,90	2,60	2,70	2,00	2,40	2,50	<b>1998</b>
2,90	3,00	2,30	2,50	3,10	3,30	3,00	3,10	2,50	3,10	2,90	2,90	3,10	<b>1999</b>
2,60	2,90	2,60	2,50	2,90	3,70	2,50	2,30	2,90	2,70	2,50	1,30	2,90	<b>2000</b>
2,80	2,80	2,30	2,60	2,90	3,00	2,90	2,80	3,10	3,00	2,70	2,90	2,50	<b>2001</b>
3,30	4,20	3,00	3,10	3,60	4,40	3,30	3,50	3,40	3,40	2,70	2,20	3,10	<b>2002</b>
3,00	2,80	2,90	3,00	2,70	3,20	2,50	3,00	3,10	2,90	3,20	4,10	3,40	<b>2003</b>
3,00	2,60	2,20	2,60	3,80	3,30	3,30	3,20	3,10	2,70	3,10	2,80	2,80	<b>2004</b>
2,90	2,60	2,20	2,70	2,90	3,50	3,10	3,10	2,90	3,00	3,50	2,80	2,50	<b>2005</b>
3,00	2,30	2,60	2,60	2,80	3,10	3,50	3,00	2,90	4,00	2,90	2,80	2,40	<b>2006</b>
2,90	2,50	2,90	2,70	2,90	3,50	3,30	3,10	2,80	3,40	3,10	2,10	2,20	<b>2007</b>
2,90	3,50	2,40	2,80	3,30	3,30	3,70	2,80	3,00	3,10	2,20	2,30	3,10	<b>2008</b>
2,90	3,00	2,50	2,70	3,10	3,40	3,00	2,80	2,90	3,10	2,80	02,7	2,90	<b>المعدل</b>

الجدول رقم 2: يبين المعدلات الشهرية والسنوية لسرعة الرياح (م/ثا) لمنطقة جميلة للفترة الممتدة من 1996 – 2008 (عن الديوان الوطني للأرصاد الجوية بتصريف)



الشكل رقم 2: يوضح معدل سرعة الرياح لمنطقة جميلة خلال سنوات 1996 إلى 2008

### I-2-3- الحرارة

تعد الحرارة من العوامل المناخية التي تساهم بشكل كبير في تعزيز حركية تدهور الآثار الحجرية، ويختلف تأثيرها حسب شدتها (انخفاضها أو ارتفاعها)، ومدتها وحسب صلابة الحجارة المكونة لهذه الآثار، ومن خلال دراسة المعطيات المناخية المتعلقة بتغيرات درجة الحرارة لمنطقة جميلة الملخصة في الجدول رقم (3)، والذي يوضح الاختلافات في متوسط درجات الحرارة القصوى والدنيا الشهرية والسنوية للفترة الزمنية الممتدة من 1996 إلى 2008، بمعدل لم يتعدى  $2,20^{\circ}\text{م}$ ، ومن خلال التدقيق في معطيات هذا الجدول يتبين أن أدنى متوسط سنوي لدرجة الحرارة الدنيا سجل في فصل الشتاء عام 2002 بـ  $(-0,20^{\circ}\text{م})$  وذلك في شهر جانفي، وأيضا في عام 2005 بـ  $(-0,7^{\circ}\text{م}$ ، و  $-0,50^{\circ}\text{م})$  في شهر جانفي وفيفيري على التوالي.

أما أقصى متوسط سنوي لدرجة الحرارة القصوى تعدي عتبة  $35^{\circ}\text{م}$  في كل من عام 1999، 2003، 2005، في شهري جويلية و أوت، وقد قمنا بترجمة تلك المعطيات الإحصائية في تمثيل بياني للتوضيح أكثر كما هو مبين في الشكل رقم (3) الذي يوضح معدل درجات الحرارة الدنيا والمتوسطة والقصوى السنوية، وبشكل عام تظهر دراسة تطور متوسطات درجات الحرارة خلال 13 سنة الماضية لمنطقة جميلة أن شهر جانفي أبرد الشهور، وجويلية أشد الشهور حرارة بـ  $35,50^{\circ}\text{م}$ .

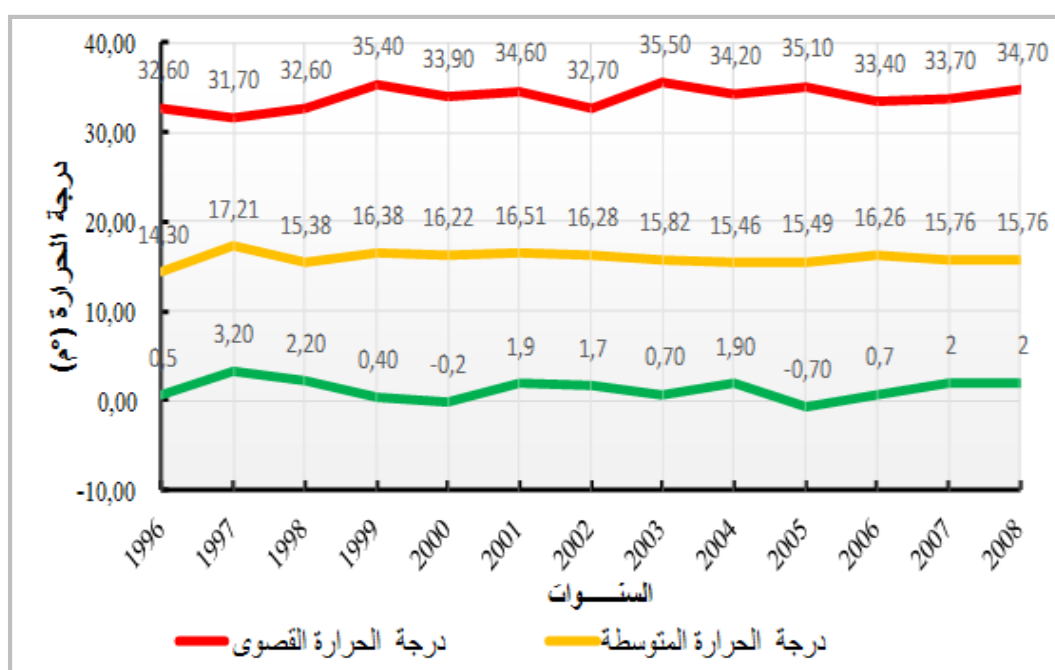
## الفصل الأول: الإطار الجغرافي والتاريخي

المعدل العام	الفصلون/ الأشهر												متوسط درجة الحرارة (م°)	السنوات
	فصل الخريف			فصل الصيف			فصل الربيع			فصل الشتاء				
	نوفمبر	أكتوبر	سبتمبر	أوت	جويلية	جوان	ماي	أفريل	مارس	فيفري	جانفي	ديسمبر	الأشهر	
19,30	15,70	19,90	24,80	32,60	31,50	25,50	20,90	15,90	13,30	8,30	11,10	12,10	الحرارة القصوى	1996
8,94	5,80	8,50	12,80	19,30	18,20	13,10	9,80	6,50	4,20	1,30	3,80	4,00	الحرارة المنخفضة	
20,68	13,50	19,90	25,20	31,00	32,90	31,70	25,60	17,50	15,50	14,40	10,40	10,60	الحرارة القصوى	1997
10,38	6,50	11,50	15,20	19,00	19,50	18,40	13,40	6,80	3,50	4,00	3,20	3,60	الحرارة المنخفضة	
19,96	13,80	19,00	27,50	31,80	34,10	29,80	19,90	18,10	14,30	12,40	10,40	9,30	الحرارة القصوى	1998
9,73	5,40	9,00	16,40	19,50	20,20	17,00	10,30	7,10	4,30	3,20	2,40	1,90	الحرارة المنخفضة	
20,88	12,50	23,00	28,00	35,40	32,60	31,30	27,40	19,20	14,00	8,00	9,70	9,40	الحرارة القصوى	1999
10,68	5,40	14,10	16,40	16,60	22,60	18,40	15,00	7,20	4,30	0,40	2,80	2,20	الحرارة المنخفضة	
21,21	15,20	18,60	27,70	32,80	33,90	28,80	26,20	19,50	16,50	13,60	9,10	12,60	الحرارة القصوى	2000
10,43	6,30	9,70	16,40	20,30	20,70	16,60	14,30	8,10	5,70	3,10	-0,20	4,20	الحرارة المنخفضة	
21,39	13,80	26,10	27,10	33,30	34,60	30,90	22,60	17,80	18,90	11,10	10,30	10,20	الحرارة القصوى	2001
10,73	5,50	14,80	15,80	18,20	21,00	17,50	11,40	7,00	8,30	1,90	2,70	1,40	الحرارة المنخفضة	
21,29	13,80	22,90	26,50	31,00	32,70	31,60	25,00	19,10	16,30	14,10	11,20	11,30	الحرارة القصوى	2002
10,22	6,80	11,80	14,70	18,50	19,00	18,00	11,90	7,80	5,60	3,20	1,70	3,60	الحرارة المنخفضة	
20,21	14,80	21,00	26,10	33,40	35,50	30,70	23,50	17,70	14,70	8,10	8,00	9,00	الحرارة القصوى	2003
10,45	6,70	12,90	15,50	20,80	21,90	18,00	11,70	8,30	4,90	0,70	2,00	2,00	الحرارة المنخفضة	
20,36	12,90	24,50	27,40	34,20	33,50	28,40	18,80	15,70	15,40	14,00	10,20	9,30	الحرارة القصوى	2004
9,79	4,80	13,50	15,10	20,60	19,60	15,40	8,40	6,20	5,40	3,70	1,90	2,90	الحرارة المنخفضة	
20,33	14,50	22,50	26,30	31,80	35,10	30,40	26,90	17,60	15,20	6,80	8,20	8,60	الحرارة القصوى	2005
9,63	5,70	12,00	14,70	18,60	20,70	17,00	13,00	7,60	5,60	<b>-0,50</b>	<b>-0,70</b>	1,90	الحرارة المنخفضة	
21,15	16,50	24,80	26,30	32,30	33,40	30,70	25,70	20,90	15,90	9,30	7,60	10,50	الحرارة القصوى	2006
10,56	7,10	13,60	14,90	18,40	20,30	17,80	14,60	9,80	5,00	<b>0,90</b>	<b>0,70</b>	3,60	الحرارة المنخفضة	

## الفصل الأول: الإطار الجغرافي والتاريخي

20,54	13,70	20,50	27,40	33,30	33,70	30,80	22,50	16,40	12,40	12,50	13,50	9,80	الحرارة القصوى	2007
10,08	4,70	11,70	15,40	20,20	19,37	17,40	11,10	8,40	3,70	3,80	3,20	2,00	الحرارة المنخفضة	
20,56	12,40	20,00	26,90	33,70	34,70	28,20	23,20	19,30	14,00	13,20	12,30	8,80	الحرارة القصوى	2008
10,13	4,90	11,30	16,40	20,20	19,70	15,40	12,40	7,60	4,00	3,20	2,20	2,00	الحرارة المنخفضة	
20,60	14,08	21,75	26,70	32,82	33,71	29,91	29,91	23,64	18,05	11,22	10,15	10,12	الحرارة القصوى	معدل العام للسنوات
10,13	5,84	11,90	15,40	19,91	20,02	16,92	12,10	7,57	4,96	2,22	1,98	2,74	الحرارة المنخفضة	

الجدول رقم 3: بين المتوسطات الشهرية والسّنوية لدرجة الحرارة القصوى والدنيا (م) لمنطقة جميلة خلال الفترة الممتدة من 1996 إلى 2008 (عن الديوان للأرصاد الجوية بتصرف)



الشكل رقم 3: يوضح معدل درجات الحرارة الدنيا والمتوسطة والقصوى السنوية لمنطقة جميلة خلال الفترة الممتدة من 1996-2008م

### 4-2- الرطوبة

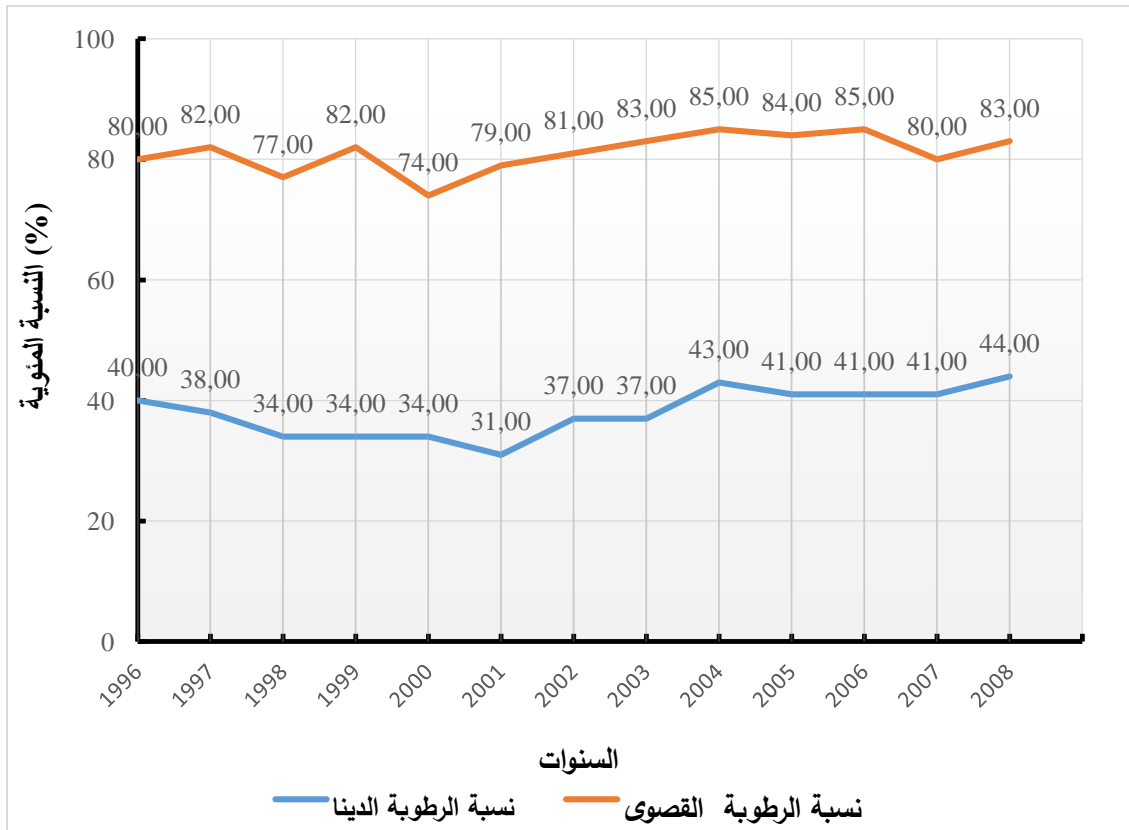
تمتاز منطقة جميلة برطوبة نسبية\* متغيرة من فصل لآخر، ومن سنة لأخرى أيضاً، وهذا ما تشير إليه البيانات المناخية للديوان الوطني للأرصاد الجوية المتعلقة بالرطوبة النسبية لمنطقة جميلة

\* تعرف الرطوبة بأنها كمية بخار الماء الموجودة في حجم معين من الهواء، وهي تنقسم إلى نوعين: رطوبة مطلقة تعبر عن النسبة بين كتلة بخار الماء وحجم الهواء عند الضّغط ودرجة الحرارة، ورطوبة نسبية وهي قيمة النسبة بين محتوى بخار الماء للهواء وقدرته القصوى على احتوائه عند الضّغط ودرجة حرارة معينة، فإذا كانت قيمته أكبر من 100% فأثما تولد تساقط.



للفترة الممتدة من 1996 إلى 2008<sup>(1)</sup> المبينة في الجدول رقم (4)، والذي من خلاله يتضح أنّ المنطقة تعرف رطوبة مرتفعة خاصة في فصل الشتاء والربيع، فأقصى نسبة لها سجلت في شهر ديسمبر بـ 85% من عام 2006 م، بينما أدنى مستوى لها فقد سجل في شهر جويلية بـ 31% من عام 2001 م.

ولقد سمح لنا هذا الجدول برسم الشكل رقم (4) الذي يمثل التغيرات للرطوبة النسبية للسنوات من 1996 إلى 2008، إذ يلاحظ عدم استقرار في نسبة الرطوبة حيث سُجل ارتفاعها بنسبة من 80 إلى 82% خلال سنتي 1996 و1999 م، غير أنّه هذا الارتفاع لم يدم طويلاً لتتناقص في السنوات الموالية، ابتداءً من سنة 2002 حتى 2008 تزايدت بشكل معتبر لتبلغ أعلى نسبة لها بـ 85% سنة 2004 و2006.



الشكل رقم 4: يوضح تطور نسبة الرطوبة النسبية القصوى والدنيا

لمنطقة جميلة خلال الفترة الممتدة من 1996 إلى 2008

(1) - الدّيون الوطني للأرصاء الجوية، معطيات الرطوبة لمنطقة جميلة للفترة الممتدة من سنة 1996 إلى 2008م

## الفصل الأول: الإطار الجغرافي والتاريخي

المعدل السنوي	الفصل الأول/ الأشهر											السنوات	
	فصل الخريف			فصل الصيف			فصل الربيع			فصل الشتاء			
	نوفمبر	أكتوبر	سبتمبر	أوت	جويلية	جوان	ماي	أفريل	مارس	فيفري	جانفي		ديسمبر
62	63,00	60,00	58,00	42,00	40,00	58,00	64,00	67,00	71,00	80,00	78,00	72,00	1996
58	82,00	73,00	63,00	47,00	38,00	40,00	45,00	58,00	55,00	64,00	75,00	79,00	1997
60	73,00	64,00	56,00	44,00	34,00	0 42,0	71,00	59,00	63,00	74,00	76,00	77,00	1998
57	77,00	60,00	54,00	34,00	38,00	40,00	42,00	55,00	67,00	79,00	78,00	82,00	1999
54	67,00	72,00	51,00	34,00	34,00	46,00	52,00	52,00	55,00	61,00	74,00	69,00	2000
56	78,00	57,00	62,00	37,00	31,00	34,00	58,00	59,00	55,00	68,00	75,00	79,00	2001
57	75,00	55,00	55,00	43,00	44,00	37,00	49,00	58,00	63,00	67,00	77,00	81,00	2002
65	77,00	73,00	63,00	46,00	37,00	47,00	63,00	71,00	72,00	83,00	83,00	83,00	2003
65	82,00	57,00	57,00	47,00	43,00	55,00	73,00	76,00	71,00	68,00	82,00	85,00	2004
63	77,00	72,00	63,00	47,00	41,00	48,00	49,00	66,00	67,00	80,00	78,00	84,00	2005
63	74,00	56,00	61,00	54,00	44,00	41,00	65,00	62,00	69,00	80,00	82,00	85,00	2006
65	77,00	72,00	63,00	45,00	41,00	48,00	64,00	76,00	78,00	80,00	72,00	80,00	2007
64	77,00	77,00	59,00	46,00	44,00	55,00	63,00	61,00	69,00	77,00	74,00	83,00	2008
60,53	75,31	65,23	58,85	43,54	39,15	45,46	58,31	63,08	65,77	73,92	77,23	79,92	معدل العام للسنوات

الجدول رقم 4: المعدلات الشهرية والسنوية للرطوبة النسبية (%) لمنطقة جميلة للسنوات الممتدة من 1996-2008<sup>(1)</sup>  
(عن الديوان الوطني للأرصاد الجوية بتصرف)

(1) الديوان الوطني للأرصاد الجوية للجزائر، معطيات الرطوبة النسبية لمنطقة جميلة للفترة الممتدة من سنة 1996 إلى 2008 م.

I-2-5- الجليد

بالرغم من كون الجليد ظاهرة فيزيائية طبيعية غير أنّ له دوراً كبيراً في إتلاف مواد بناء الموقع الأثري، خاصة المسامية منها، من خلال تحويله للمياه التي تشغل مساماتها وشقوقها إلى جليد عند انخفاض درجة الحرارة إلى ما دون 0°م، والذي يرافقه زيادة في حجمه بنسبة قد تصل إلى 9%<sup>(1)</sup>، هذا ما يولد ضغطاً متزايداً على جدران المسامات والشقوق، قد تتسبب في تشكل شقوق إذا تجاوزت قوة تحملها، وتكرار هذه الظاهرة تنتشر وتتوسع تلك الشقوق، مما يضعف هذه المواد ويفقدها صلابتها بشكل تدريجي الأمر الذي ينعكس سلباً على ديمومة المباني المتشكلة منها، وبالنظر إلى معطيات الديوان الوطني للأرصاد الجوية لمنطقة جميلة للفترة الممتدة بين 1996 إلى 2005م المتعلقة بتشكيل الجليد الملخصة في الجدول رقم (5).

المجموع السنوي	الفصل/ الأشهر												السنوات
	فصل الخريف			فصل الصيف			فصل الربيع			فصل الشتاء			
	نوفمبر	أكتوبر	سبتمبر	أوت	جويلية	جوان	ماي	أفريل	مارس	فيفري	جانفي	ديسمبر	
61	7	0	0	0	0	0	1	8	12	14	12	7	1996
54	5	0	0	0	0	0	0	3	12	12	11	11	1997
79	4	0	0	0	0	0	0	4	19	17	18	17	1998
49	9	0	0	0	0	0	0	4	10	9	8	9	1999
60	5	0	0	0	0	0	0	3	5	11	26	10	2000
52	5	0	0	0	0	0	0	1	2	18	11	15	2001
38	2	0	0	0	0	0	0	0	3	10	19	4	2002
36	2	0	0	0	0	0	0	1	2	16	4	11	2003
47	5	0	0	0	0	0	0	3	6	14	11	8	2004
61	4	0	0	0	0	0	0	1	8	15	24	9	2005
-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2006
-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2007
-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2008
537	48	0	0	0	0	0	1	28	79	136	144	101	مجموع السنوات

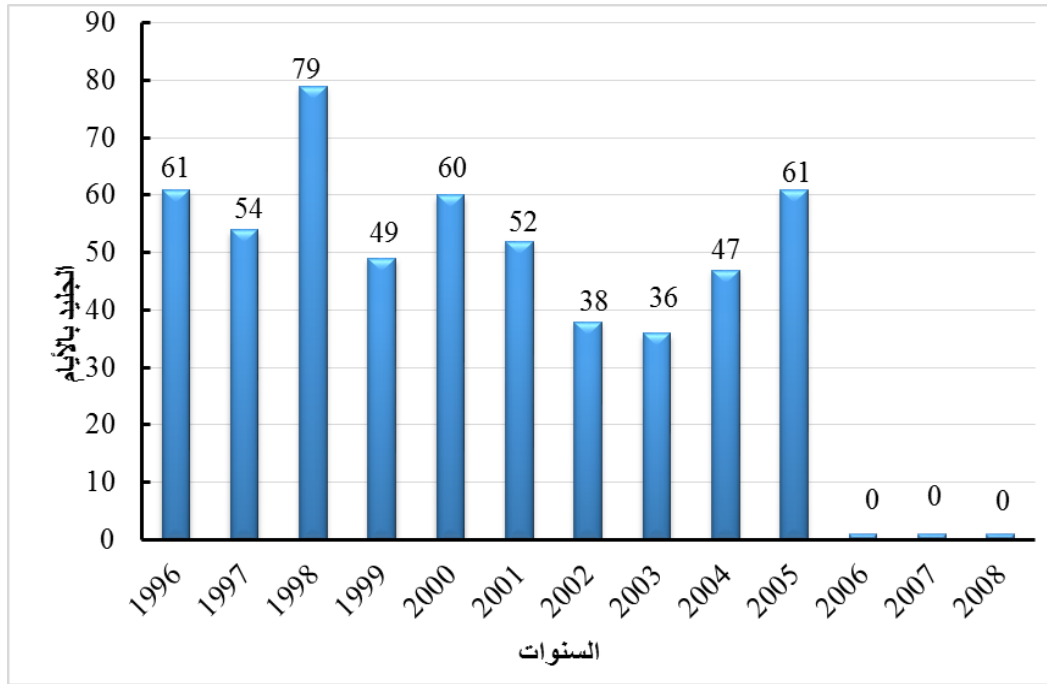
الجدول رقم 5: يبين أيام تشكّل الجليد لمنطقة جميلة للسنوات من 1996 إلى 2008<sup>(2)</sup>

(1) -Charlotte Walbert· endommagement par le gel de pierres calcaires utilisées dans le patrimoine bâti : étude du comportement hydromécanique, thèse de doctorat, université de Cergy-pontoise, France, 2015,p13

(2) -الديوان الوطني للأرصاد الجوية للجزائر العاصمة، معطيات تشكل الجليد للسنوات من 1996 إلى 2008.

من خلال معطيات هذا الجدول يتبين أنّ المنطقة تعرف تشكل معتبر للجليد، يبدأ من أواخر فصل الخريف ويستمر حتى فصل الربيع لكن بكثافة أقل، كما يلاحظ طول فترة الجليد تصل إلى 79 يوماً في السنة، مما يجعل حجارة الموقع الأثري عرضةً للتأثير السلبي للجليد، بينما ينعدم تشكّله في فصل الصيف وبداية فصل الخريف، حيث سجل أعلى مستوى له في شهر جانفي بـ 26 يوماً من سنة 2000م.

بينما أدنى مستوى بلغه في شهر ديسمبر بـ 7 أيام من سنة 1996م، وقد سمح لنا هذا الجدول بتمثيل بياني لعدد أيام تشكل الجليد للسنوات من 1996 إلى 2005 (الشكل رقم 5)، والذي يتضح من خلاله أنّ السنوات، 1998، 1996، 1997، و 2000 و 2005م كانت أكثر برودة، حيث بلغت فيها أيام تشكّل الجليد من 52 إلى 79 يوماً، بينما السنوات 1999، و 2002 إلى 2004 كانت أقل برودة مقارنة مع السنوات الأخرى، إذ لم تتعدى أيام تشكّل الجليد فيها 50 يوماً.



الشكل رقم 5: أعمدة بيانية تمثل عدد أيام تشكّل الجليد لمنطقة

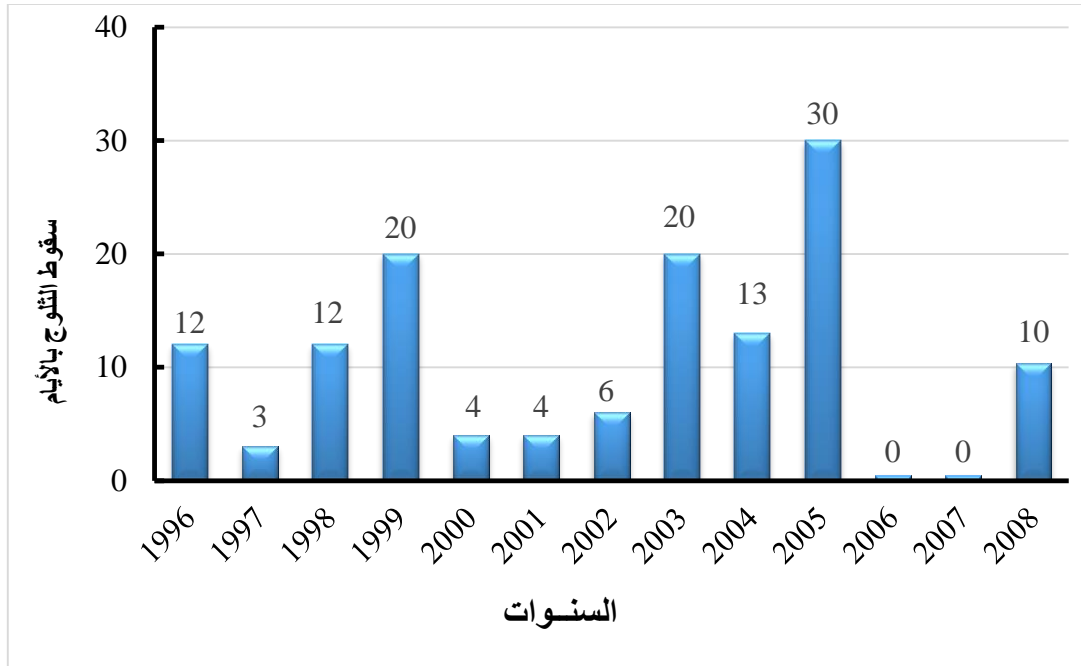
جميلة خلال السنوات الممتدة من 1996 إلى 2008

## 6-2-I تساقط الثلوج

بمأن جميلة تتواجد في بيئة جبلية مرتفعة فهي تشهد تساقطاً معتبراً للثلوج،

وهذا ما تؤكدُه معطيات الديوان الوطني للأرصاد الجوية (1)، المبينة في الجدول (رقم 6) أدناه، الذي يتضح من خلاله أنّ تساقط الثلوج يبدأ من شهر نوفمبر ويستمر حتى شهر مارس، وأحياناً يمتد إلى شهر أبريل، وقد قدر المعدل السنوي لأيام تساقط الثلوج بـ 10 أيام في السنة، وأقصى تساقط كان في شهر فيفري بـ 11 يوماً من سنة 1996، تليها سنة 2005 م بـ 10 أيام، أما أدنى مدة فقد سجلت بيوم واحد.

نستنتج مما سبق أنّ المنطقة تعرف تساقطاً معتبراً للثلوج يصل إلى (11) يوم في السنة، وقد يتعدى سمكها 50 سم، وإذا ما قورنت هذه المعطيات مع معطيات سنة 1935 م فيلاحظ تغيراً كبيراً في التساقط، حيث كانت الثلوج تسقط لمدة 40 يوماً في السنة (2)، وهذا ما عرض حجارة بناء الموقع الأثري للتلف نتيجة زيادة الثقل على الهياكل، وتشبع الحجارة وانخفاض درجة الحرارة، ومن خلال الشكل رقم (6) يتضح أنّ التساقط خلال السنوات 1997 و2001 و2002 و2004 متدني مقارنة مع السنوات الأخرى.



الشكل رقم 6: أعمدة بيانية تمثل تساقط السنوي للثلوج لمنطقة جميلة

خلال السنوات الممتدة من 1996-2008

(1) -الديوان الوطني للأرصاد الجوية للجزائر العاصمة، معطيات تساقط الثلوج لمنطقة جميلة للسنوات من 1996 إلى 2008.

(2) - منصور هجرس، مرجع سابق، ص 37.

المجموع السنوي	الأشهر												السنوات
	نوفمبر	أكتوبر	سبتمبر	أوت	جويلية	جوان	ماي	أفريل	مارس	فيفيري	جانفي	ديسمبر	
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	1	1996
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1997
12	4	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	3	1998
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	4	5	1999
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2000
4	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	2001
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	1	2002
20	0	0	0	0	0	0	0	2	1	4	7	6	2003
13	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	4	5	2004
30	3	0	0	0	0	0	0	2	4	10	8	3	2005
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2006
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2007
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2008
134	8	0	0	0	0	0	0	4	11	45	29	27	المجموع

الجدول رقم 6: يبين التساقط الشهري للتلوج لمنطقة جميلة خلال الفترة الممتدة من 1996 إلى 2008 (عن الديوان للأرصاء الجوية بتصرف)

## II- الإطار التاريخي

عرفت جميلة عبر تاريخها الطويل حضارة عريقة لازالت بصمتها شاهدة عليها حتى يومنا هذا، فحسب الروايات التاريخية يعود تشييدها إلى نهاية القرن الأول الميلادي في عهد الإمبراطور الروماني "نيرفا، ناهيك عن أخذها عدة تسميات، عرفت باسم «كويكول» في العهد الروماني بدليل الآثار التي وجدت في تلك المنطقة، أما بخصوص أصل التسمية فقد ذكرت الأنسة "أليس إيفون" أن أصلها أمازيغي لكن معناه غير معروف، تبناه الرومان دون أن يحولوه إلى اللاتينية<sup>(1)</sup>، أما "بول فيفري" <sup>(2)</sup> فيرى غير ذلك، إذ يشير بأن كويكول عرفت باسم النيرفاتية نسبة إلى الإمبراطور نيرفا الذي أسسها، ويستدل على ذلك بأجزاء من النصب التأسيسي الذي عثر عليه بالمنطقة.

غير أن تلك التسميات اختفت وأصبحت تعرف باسم جميلة الذي أطلق عليها منذ الفتح الإسلامي وظل سائداً إلى يومنا هذا، كما أن تباين هذه التسميات أضفى على المدينة سحراً خاصاً وزادها عراقاً وثراءً.

### II-1- لمحة تاريخية عن المدينة

تقع جميلة في الشمال الشرقي لولاية سطيف ضمن منطقة عرفت نشاطاً بشرياً يعود للعصور القديمة، بدليل الآثار التي عثر عليها من أدوات حجرية مصقولة وبقايا عظمية حيوانية تعود لبداية العصر الحجري القديم بعين الحنش وعين مزلق، كما عثر على بقايا لحضارة أخرى تسمى الكابسية تعود للألف الثامنة<sup>(3)</sup>.

أما بخصوص نشأة المستعمرة الرومانية كويكول فحسب المعلومات التاريخية فإن هذه المستعمرة تنتمي لمستوطنات القرن الأول ميلادي خلال عهد الإمبراطور نيرفا (96 و 98 م)<sup>(4)</sup>، في حين "ستيفان غزال" يري بأنها تأسست في عهد الإمبراطور تراجان مثل تيمقاد<sup>(5)</sup>.

(1)- Allais, Yvonne, Djemila, Algérie, 1938, p07.

(2)- Février Paul-Albert, Djemila, direction des arts, musées, monuments historique, antiquités, Alger, 2<sup>eme</sup> édition, 1978,p13.

(3)- زكي بوزيد، ترجمة الإنعام بيوض، جرائر الأزل، المواقع المدرجة ضمن التراث العالمي، منشورات رياض الفتح الجزائر، 2007، ص 170.

(4)-Février Paul-Albert ,Opo.cit ,p13.

(5)-Gsell Stéphane, Les monuments antiques de l'algerie, T1, Paris.1901,p 11

فضلاً عن ذلك، كويكول تعتبر من أهم المستوطنات الرومانية في شمال إفريقيا، شيدت لإقامة الجنود العسكريين، وعرفت عدة محطات تاريخية من أهمها: فترة الأنطونيين (96-92م) التي تعد فترة ازدهار هامة، شهدت خلالها المدينة توسعات عمرانية كبيرة، شيد خلالها ما يعرف بالمدينة القديمة، والتي تضم العديد من المباني العامة والخاصة، من بينها الساحة العامة، معبد الكابتول، ومعبد فينوس جنيتريكس، البازيليكا القضائية، وسوق الأخوين كوزينوس، الحمامات الكبرى، والمسرح، وعدة منازل فخمة كمنزل كاستوريوس، ومنزل الحمار المنتصر، ومنزل أمفيتريت، ومنزل أوروبا وغيرها من المعالم (1)؛

تليها الفترة السيفيرية نسبة إلى أسرة الإمبراطور سيبتيموس سيفيروس التي حكمت من سنة 193 إلى 235م، وقد عرفت خلالها زيادة سكانية معتبرة، حيث أصبح حصن المدينة القديمة يضيق بالسكان وبالوافدين عليها، الأمر الذي دفع لتهديم أجزاء من أسوارها والتوسع نحو الجنوب، وبناء أحياء جديدة ضمت العديد من المباني، أهمها الساحة العامة الجديدة التي تعرف بالساحة السيفيرية، ومعبد العائلة السيفيرية، النافورات العامة، وقوس كركلا، إلى جانب منزل باخوس (2)؛

وابتداءً من القرن الرابع الميلادي ونتيجة التحوّل إلى المسيحية، شهدت المدينة نشاطاً عمرانياً مزدهراً شيد خلاله ما يعرف بالحي المسيحي الذي يقع في الحدود الجنوبية الشرقية للمنطقة، والذي يضم الكنيسة والمعمودية؛

أما في سنة 431م فقد تعرضت المدينة للغزو الوندالي، مما تسبب في تخريب العديد من المباني وهجرة الكثير من السكان، لكن هذه السيطرة لم تدم طويلاً ليتلاشى حكم الوندال وتدخل على إثره المدينة تحت النفوذ البيزنطي من سنة 442م (3)، والذين عملوا جاهدين خلال فترة حكمهم على إحياء المدينة من خلال إصلاح وترميم العديد من المباني الهامة وبناء مباني جديدة.

(1) -Esméralda de Luis, en la frontera romana de la antigua numidiai – Cuicul (Djemila- Argelia), centro europeo para la difusión de las ciencias Sociales (CEDCS), España, 2013,p5.

(2) -Allais, Yvonne, op.cit, p20.

(3) -Ibid, p6.



استمرت جميلة كحاضرة من حواضر الشرق الجزائري، لكن بعد الفتح الإسلامي لمنطقة سطيف سنة 59 هـ 678م<sup>(1)</sup>، وبسبب قربها من مدينتي سطيف وقسنطينة، فقد فقدت أهميتها وقل شأنها فعاشت في عزلة يلفها الإهمال والنسيان.

ومع بداية سيطرة الإستعمار الفرنسي على المنطقة سنة 1845م، تم اكتشاف المدينة الأثرية لجميلة وتحديد هويتها بـ (كويكول) من طرف البعثة الفرنسية الملحقة مع الجيش الفرنسي، حيث قام كل من المهندس Ravoisié وقائد المدفعية Delamare، برفع معماري لأجزاء مختلفة من الموقع الأثري، وجمع العديد من التسجيلات والقطع الأثرية، بعضها محفوظ في متحف اللوفر بفرنسا، حتى أنهم فكروا في تفكيك قوس كركلا ونقله إلى باريس لإعادة تركيبه فيها، وإحياء المدينة قاموا بالعديد من عمليات التثقيب بدايةً من عام 1909م تحت مسؤولية مهندس المعالم التاريخية Ballu، وقد استمرت حتى سنة 1957م تحت إشراف (السيد Crésolles، والآنسة Y Allais)<sup>(2)</sup>.

وتجدر الإشارة إلى أنّ هذه الحفريات كشفت عن 42 هكتار ما يعادل 60% من المدينة، كما كانت هذه الحفريات مصحوبة بعمليات ترميم سريعة، والتي أظهرت الموقع كما هو عليه الآن، كما تم بناء متحف بالموقع الأثري يحتوي عدة قاعات تضم العديد من القطع الأثرية والفسيفساء والتماثيل المكتشفة في الموقع، ومنذ 1930م أصبحت جميلة واحدة من الأهداف المميزة للسياحة الأثرية في الجزائر مثل تيبازة وتيمقاد وتبسة، ونظراً لما تكتسبه من أهمية أثرية وتاريخية تم تصنيفها ضمن قائمة التراث الإنساني سنة 1982 م.

## II-2- أهم معالم الموقع الأثري

تُعتبر مدينة جميلة الأثرية من أقدم المدن الرومانية في الجزائر، حيث لا تزال تحافظ على معالمها مثل تيمقاد، وروسيكاد (سكيكدة حالياً)، وسيتيفيس "Setifis" (سطيف حالياً)، وغيرها، حيث تتميز باحتوائها على مجموعة من المعالم شيّدت عبر

(1) - عبد الرحمان الجيلالي، تاريخ الجزائر العام، الجزء الأول، دار مكتبة الحياة، بيروت 1965، ص 128  
(2) - Duval Noël, Op.cit, 1995. pp2442-2449.

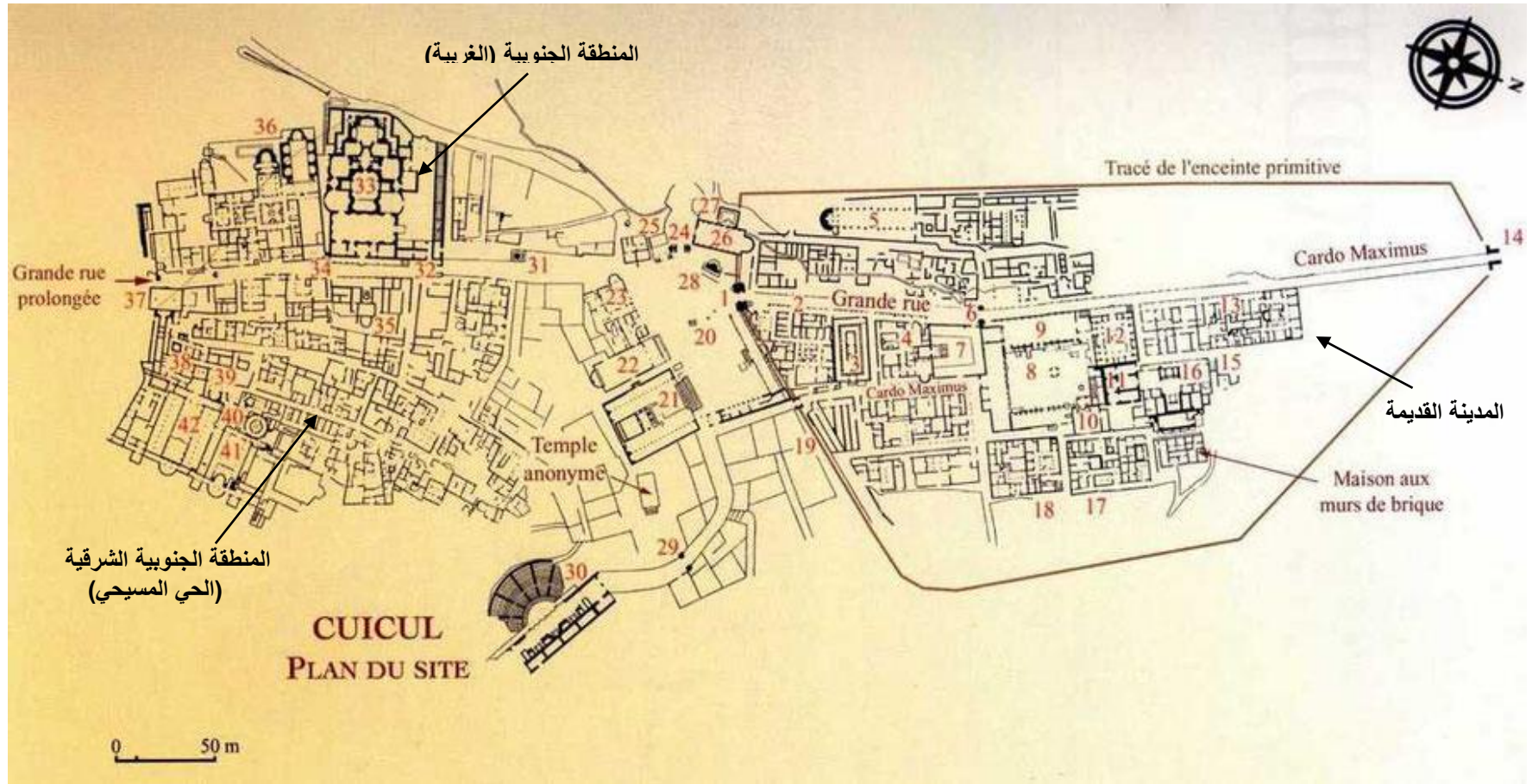
## الفصل الأول: الإطار الجغرافي والتاريخي

تاريخها الطويل، حوالي 42 معلماً، تتوزع على مساحة تزيد على 42 هكتار، تمثل ما تبقى من المدينة في الفترة التي تمتد بين القرن الأول والرابع الميلادي (مخطط رقم 1). ولقد عرفت المدينة عبر تاريخها العديد من التوسعات، أهمها توسع النسيج العمراني نحو الجنوب الشرقي، ثم الجنوب الغربي الذي وقع قبل القرن الثالث الميلادي، الذي ميزه تشييد الساحة السيفيرية، لتليها المرحلة الأخيرة، والتي تتمثل في تشييد الحي المسيحي الذي يضم المجموعة الدينية (المعمودية والكنسية)، وبناء على توسع المدينة يمكن تقسيم مخططها إلى ثلاثة أجزاء: المدينة القديمة المعروفة باسم الضواحي الشمالية، والمدينة الجديدة المعروفة بالمنطقة الجنوبية، أما المنطقة الواقعة في الجهة الجنوبية الشرقية فتعرف بالحي المسيحي، وهي تضم مجموعة من المعالم التي تشهد على عراققتها.

Basilique civile du IV°	22	البازيليكا المدنية ق IV م	Porte méridionale et enceinte	1	الباب الجنوبي والاستحكام
Maison de la mosaïque d'Hylas	23	منزل فسيفساء " هيلاس "	Maison de Castorius	2	منزل كاستوريوس
Arc de Caracalla	24	قوس النصر "كركلا"	Temple anonyme	3	معبد مجهول
Petit temple	25	معبد صغير	Maison de l'âne	4	منزل الحمار
Marché aux étoffes	26	سوق	Quartier Ouest et basilique	5	الحي الغربي والبازيليكا
Latrines publiques	27	مراحيض عامة	Arc	6	قوس
Nymphée	28	متحف الحوريات	Temple de Venus Genetrix	7	معبد فينوس جنتريكس
Arc de Julius Crescens	29	قوس يوليوس كريسنوس	Forum	8	الساحة العمومية الفوروم
Théâtre	30	المسرح	Basilique Julia	9	بازيليك جوليا
Fontaine	31	نافورة	Curie	10	مجلس العشيرة
Porte de basse époque	32	باب الفترة القديمة	Capitole	11	الكابيتول
Grands thermes	33	الحمامات الكبرى	Marché de Cosinius	12	سوق الأخوين كوزينوس
Fontaine de la Tétrarchie	34	نافورة	Maison d'Europe	13	منزل أوروبا
Petite salle à abside	35	قاعة صغيرة ذات الحنية	Porte septentrionale	14	الباب الشمالي
Maison de Bacchus	36	منزل باخوس	Latrines publiques	15	مراحيض عامة
chrétien Entrée du quartier	37	مدخل الحي المسيحي	Thermes	16	حمامات
Maison de l'évêque et du	38	بيت الأسقف والكاهن	Thermes de Terentius	17	حمامات ترنتيوس
Chapelle chrétienne	39	مصلى الكنيسة	Maison d'Amphitrite	18	منزل أمفتريت
Baptistère et thermes annexes	40	المعمدانية والحمامات الملحقة	Greniers publics	19	المخازن العامة
Basilique Nord	41	البازيليكا الشمالية	Place des Sévères	20	الساحة السيفيرية
Basilique Cresconius	42	بازيليكا كروسكنيوس	Temple de la famille	21	المعبد السيفيري

### مفتاح مخطط مدينة كويكول

## الفصل الأول: الإطار الجغرافي والتاريخي



المخطط رقم 1: المدين ة الأثرية لجميلة (cuicul)<sup>(1)</sup>

(1)-Blas De Roblès Jean-Mari, Sintes Claude· Sites et monuments antiques de l'Algérie, Edisud, 2003, p88 (modifié).

## II-2-1-1 المدينة القديمة

تُعتبر المدينة القديمة النّواة الأولى للتّجمع السّكاني لكويكول، يتبع تخطيطها العام نظام المدن الرّومانية السّائد آنذاك (المخطط الشّطرنجي)، وهي تضم مجموعة من المعالم الأثرية التي تشهد على عراققتها حيث ماتزال تحافظ على تصميمها الأصلي، ومن أهمها نذكر:

### II-2-1-2 الكاردوا مكسيموس

يُعد الكاردوا مكسيموس أحد أهم الشّوارع الرّئيسية للمدينة، يرجع تاريخه إلى بداية تأسيس المدينة<sup>(1)</sup>، يتواجد في أقصى الجزء الغربي للمدينة، نجد في قمته الساحة العامة، كان يحيط به رواق مسقف يقوم على أعمدة حيث لم يتبقى منها إلا بعضها، وبالرغم من وجود بعض البلاطات الحجرية المكسورة، إلا أنّ حالة حفظه ما تزال جيدة بشكل عام.

### II-2-1-2 الفوروم القديمة

تُعتبر الفوروم (ساحة عمومية) قلب المدينة ومركز نشاطها الاجتماعي والسياسي والتّجاري، وقد عرفت عدة تغيّرات خاصةً مع بداية القرن الثالث الميلادي<sup>(2)</sup>، تقع إلى الشّرق في مفترق الطرق بين الكاردوا والدوكومانوس، لها شكل غير منتظم<sup>(3)</sup>، تضم مجموعة هامة من المباني العامة (الكابيتول، وسوق كوسينيوس، ومعبد فينوس جينتريكس، والبازيليكا القضائية)، وقد زينت بأنصاب تذكارية نقشت عليها إهداءات السّكان للأباطرة<sup>(4)</sup>.

### II-2-1-3 مجلس العشيرة

يتواجد مجلس العشيرة في الرّكن الشّمالي الشّرقى للفوروم بالقرب من الكابيتول، يُعد مقراً لتسيير شؤون حكم المدينة، عبارة عن ساحة واسعة ذات شكل مربع، تحيط بها كتل حجرية منحوتة كبيرة الحجم، وقد غطيت جدرانه بلوحات من حجارة الأونيكس، أما الأرضية فكانت مبلطة بالرخام الأحمر<sup>(5)</sup>.

(1) -Esmeralda de luis,op cit,p8.

(2) -Février Paul-Albert,, opcit,p 43.

(3) -Berque Jacques, art antique et art musulman en Algérie, Strasbourg, 2003, p12.

(4) - حارش (محمد الهادي)، التاريخ المغاربي القديم (السياسي والحضاري منذ فجر التّاريخ إلى الفتح الإسلامي)، المؤسسة الجزائرية للطباعة، الجزائر 1995 م، ص 214.

(5) - Esméralda de Luis, Op cit, p8

## II- 4-1-2- الكابيتول

يقع الكابيتول شمال شرق الفوروم، يعود تاريخ بنائه للقرن الأول الميلادي، يعد بمثابة مركز سياسي وديني خصص لعبادة المعبودات الرومانية الثلاثة (جوبيتر، مينرفا، جونو)، لديه تصميم ذو شكل رباعي ينقسم إلى ست أجزاء<sup>(1)</sup>، يتميز بهيكل صلب مدعم بركائز مع أقواس وجدران سميكة، استخدم في بنائه الحجارة الكلسية الصلبة بتقنية النظام الكبير.

## II- 5-1-2- سوق كوزينيوس

شيد سوق الإخوة كوزينيوس من قبل أحد أثرياء المدينة يدعى "لوكيونوس كوزينوس بريموس"، يرجع تاريخ بنائه للفترة الممتدة ما بين 138-161م<sup>(2)</sup>، وهو يقع في الجهة الشمالية بمحاذاة الكابيتول، يتربع على مساحة 12 x 28 م<sup>2</sup>، يتكون من 18 محل مربع الشكل، يضم ساحة مركزية مربعة، كما يضم هذا السوق في مركز واجهته الشرقية طاولة عامة للموازين (salle de poids publics) والتي توجد إلا في جميلة فقط، تتكون من ثلاثة فتحات لوزن مختلف المواد (السائلة، والصلبة)، ووحدة لقياس الأقمشة<sup>(3)</sup>.

## II- 6-1-2- البازيليك القضائية

استخدمت البازيليك في العمارة الرومانية كقاعة للعدالة، ومركز لعقد الصفقات التجارية، شيدت عام 169م في عهد الإمبراطور سيفيروس<sup>(4)</sup>، تتموقع في الجزء الغربي من الفوروم، تعرف أيضاً باسم بازيليك جوليا، ذات شكل مستطيل بمساحة 532 م<sup>2</sup><sup>(5)</sup>.

## II- 7-1-2- معبد فينوس جينتريكس

يُعد هذا المعلم شاهداً حياً على الجانب الديني للمدينة، يقع داخل الساحة القديمة، أهديا لآلهة الحب والجمال فينوس، ثم حول لاحقاً لعبادة آلهة الأمومة والوطن "فينوس جينتريكس"<sup>(6)</sup>، أما حالة حفظه متدهورة جداً حيث لم يتبقى منه إلا الدرج المركزي وبعض الأجزاء من الأعمدة.

(1)-Ibid ,p8

(2)- Février Paul-Albert, Op. cit ,p 47.

(3)-Berque Jacques, Op cit, p18.

(4)-Esméralda de Luis, Op. cit,p9.

(5)- Février Paul-Albert,Op. cit ,p 43.

(6)-Ibid, p9.



## II- 8-1-2- المسرح

يُعتبر مسرح جميلة من أقدم المسارح الرومانية في شمال إفريقيا، إذ يعود تاريخ بنائه إلى عام 160م، يتواجد خارج المدينة القديمة، ذو تصميم معماري مميز، حيث تم استغلال انحدار الأرضية لإنجاز مدرجاته، تتراوح مقاساته من 69 إلى 70 متر، يتجه نحو الشمال<sup>(1)</sup>، يحتوي على ثلاثة مدرجات تضم 160 مقعداً تتسع تقريباً من 2500 حتى 3000 متفرج<sup>(2)</sup>. بالرغم من وجود بعض الأضرار نتيجة عوامل التآلف الطبيعية والبشرية التي تعرض لها عبر تاريخه الطويل، إلا أنه لا يزال يحافظ على شكله العام.

## II- 2-2- المنازل الخاصة

لقد تميّزت مدينة جميلة بمنازل خاصّة بالأثرية ذات تخطيط مميز حيث جهزت بمختلف مرافق الراحة والرّفاهية من حمامات، وحدائق وأروقة، كما زينت جدرانها الداخليّة وأرضيتها بالفسيفساء، ومن أهم هذه المنازل نذكر:

## II- 2-2-1- منزل كاسترويوس

يُعتبر منزل كاسترويوس من المنازل الأكثر فخامة في هذه المدينة، يرجع تاريخ بنائه إلى القرن الثاني الميلادي، يعود لأحد حكام المدينة السيد "كاسترويوس"، اكتشف سنة 1912م، يتربع على مساحة تقدر بحوالي 1500 م<sup>2</sup><sup>(3)</sup>، يوجد قرب الساحة العامة، أما تخطيطه فيتناغم مع طبوغرافية الأرضية المائلة في تحفة معمارية رائعة، ذو شكل رباعي غير منتظم، يضم مجموعة من الغرف تتفتح على ساحة مركزية محاطة برواق بأعمدة ذات تيجان تورسكية<sup>(4)</sup>.

ولقد جهز المبنى بمختلف متطلبات الحياة والرّفاهية التي تعبر عن مدى الرقي والتطور الحضاري في تلك الفترة، ناهيك عن الزخارف الفسيفسائية التي تزيّن جدران وأرضيات المنزل، والتي تصور موضوعات مختلفة من الحياة اليومية، أما هيكل البناء فيقوم على نظام الجدران الحاملة وفق التّقنية الإفريقية كما هو ظاهر في الواجهة الجنوبية.

(1)- Février Paul-Albert, Op.cit, p61.

(2)- Berque Jacques, Op.cit, p14.

(3)- Février Paul-Albert, Op.cit, p 30.

(4)- Michèle Blanchard-lemée, Maisons à mosaïques du quartier central de Djemila, Aix-en-provence, 1975, p153

## II-2-2-2 - منزل الحمار المنتصر

يوجد هذا المنزل في شمال المدينة القديمة خلف معبد فينوس جنيتريكس، أخذ هذه التسمية نسبة للحيوان الذي تظهر صورته على الأرصفة يرافقها نقش "أسينوس نيكاً" «assunius nica»، أما بخصوص تاريخ بنائه فيرجح أنه شيد في القرن الرابع الميلادي<sup>(1)</sup>، أكتشف المنزل سنة 1910م، كان محل العديد من عمليات التنقيب والترميم التي استمرت إلى غاية 1957م، والتي كانت في مجملها تهدف إلى تصحيح وتقويم أخطاء الترميمات السابقة، تصميم المبنى ذو شكل مستطيل، يحتوي على بهو كبير بأعمدة وغرف وأروقة، وقاعة كبيرة وحمام ومسبح، الدّخول للمنزل يكون من الكارودا مكسيموس والكارودو الكبير، أما بخصوص تقنية بناء المنزل فمن مظهره يستخلص أنه شيد بالكامل بالتقنية الإفريقية.

## II-2-2-3 - منزل أمفريت

يُعتبر منزل أمفريت من المنازل الهامة في هذه المدينة، يتواجد بالقرب من مجلس العشيرة والكاردوا، ذو تخطيط بسيط، جدرانه سميقة منجزة من الآجر والحجارة الكلسية، كما تم حماية الجدار الخارجي للواجهة الشمالية من تأثير الرطوبة بإضافة طبقة من الآجر المحروق<sup>(2)</sup>، أما الأرضيات الداخلية للمنزل فبلطت بفسيفساء من الرخام، لقد كان المنزل محل العديد من الحفريات أبرزها التي تمت سنة 1912م أين تم رفع فسيفساء الأرضية عثر عليها في الرواق الغربي، وفي 1916م أين تم إظهار معظم أجزاء المنزل، ونظراً لعدم وجود دليل مادي على تاريخ بنائه، فقد رجح «Michèle Blanchard-lamée» أنه بني في القرن الرابع الميلادي<sup>(3)</sup>، أما "بول فيفري" فيرجع تاريخ تشييده إلى عام 199م<sup>(4)</sup>.

## II-2-2-4 - منزل أوروبا

يُعد منزل أوروبا من المباني المميزة للمدينة القديمة، يتربع على مساحة تقدر بـ 1366 متراً مربعاً، فضاءاته تتفتح على بهو يحيط به رواق بأعمدة، أما تصميم المنزل فيتبع كذلك طبوغرافية الأرضية المنحدرة مثل منزل كاستوريوس، اتبع في بنائه التقنية الإفريقية، وقد استخدم في إنجاز أعمدته الحجر الكلسي البني والحجر الكلسي

(1)-Michèle Blanchard-lemée ,Ibid, pp23 -25.

(2)-Ibid,p 108.

(3)-Ibid,p114.

(4)- Février Paul-Albert, Op.cit p 51.

الأبيض، والحجر الجيري الأصفر، أما أرضياته فزينت بالفسيفساء ، في حين جدرانه منجزة من الآجر المحرق<sup>(1)</sup>، أما بخصوص حالة حفظه فهي متدهورة، فقد تهدم جزءاً كبيراً منه لم يبق إلا بعض الأجزاء من أقسامه الرئيسية (البهو المعمد في الشمال).

## II-3-2- المدينة الجديدة

تم تشييد هذه المدينة كحتمية عندما أصبح حصن المدينة القديمة يضيق بمن فيه، وذلك في أواخر القرن الثاني وبداية القرن الثالث الميلادي، وعلى إثر ذلك بدأت حركة توسع عمرانية نشطة خلف أسوار الجهة الجنوبية للمدينة، مما أدى إلى تهديم أجزاء من هذه الأسوار، وامتداد المدينة نحو الشرق والجنوب، هذا التوسع الجديد يعرف بالمدينة الجديدة والذي أنتج عدة مباني عامة وخاصة من أهمها:

## II-3-2-1- الفوروم السيفيري

لقد أدى التوسع العمراني الذي شهدته المدينة في أواخر القرن الثاني وبداية القرن الثالث ميلادي، إلى تشييد ساحة عمومية ثانية سميت بالفوروم الجنوبية، وتعرف أيضاً بساحة السيفيريين" نسبة إلى الإمبراطور سيفيروس، وهي تتربع على مساحة واسعة تقدر بحوالي 3200,00 متر مربع<sup>(2)</sup>، لديها موقع مميز يفصل بين الأحياء القديمة والجديدة، كما تحيط بها العديد من المعالم الهامة، أبرزها قوس كركلا، والمعبد السيفيري، أما مخطط الساحة فذو شكل غير منتظم مع أرضية غير مستوية منحدرية، وهي مفتوحة لحركة المرور مشكلة نقطة إلتقاء الشوارع الرئيسية.

## II-3-2-2- المعبد السيفيري

يقع المعبد السيفيري في الركن الجنوبي الشرقي للساحة السيفيرية، يعود تاريخ بنائه إلى عام 229م في عهد الإمبراطور سيفيروس، يقوم على منصة محاطة بأعمدة، الوصول إليه عبر درج كبير يتكون من 26 سلمة، تتقدم واجهته أعمدة كورنثية ذات ارتفاع أكثر من عشرة (10) أمتار، بعدها يوجد باب بإطار ذو شكل مستطيل يؤدي إلى داخل المعبد، يتضمن قوساً مفتوحاً مزيناً بتمائيل للإمبراطور سيبتيميوس سيفيروس وزوجته جوليا دومنا<sup>(3)</sup>.

(1)-Michèle Blanchard-Iamée, Op.cit ,p 132.

(2)- Février Paul-Albert, Op.cit, p 61.

(3)- Esméralda de Luis, Op.cit, p10.



## II-3-3-2- قوس كركلا

يُعد قوس كركلا من أقدم أقواس النصر في الجزائر، شيد في عام 216 م<sup>(1)</sup>، هو عبارة عن بناء أحادي القوس، يوجد هذا المعلم على الطريق الذي يربط كويكول بمدينة سطيف إذ يُعتبر مدخلاً للمدينة من الجهة الجنوبية، القوس نصف دائري قطره 4,35 متر، ارتفاعه حوالي 12,50 متر، وعرض 10,60 متر، مزين بأعمدة كورنثية ومحاريب نصف دائرية لإيواء التماثيل، أما في جزئه العلوي فنجد نقشاً مؤرخاً سنة 216م، يذكر فيه أنّ المعلم شيد من قبل سكان مدينة كويكول تكريماً للإمبراطور كركلا و والدته جوليا دومنا و والده سيبتيموس سيفيروس<sup>(2)</sup>. استخدم في تشييده الحجر الكلسي بتقنية النظام الكبير.

## II-3-2-4 النافورة المخروطية

تقع النافورة المخروطية في الشارع الكبير بالقرب من الحمامات الكبرى، هي عبارة عن كتلة حجرية واحدة ذات شكل مخروطي تتكون من عدة أجزاء، تحتوي في مركزها على حوض دائري يبلغ محيطه 10,20 متر، مشكلة من دعائم وبلاطات متداخلة ومتراكبة، قاعدة النافورة مع الحوض منجزة بالحجارة الرملية المصقولة والتي تآكل بعضها عبر تاريخها<sup>(3)</sup>، أما بخصوص حالة حفظها فهي سيئة، حيث تظهر وجود شقوق على مستوى المخروط، مع تحرك البلاطات والدعامات، وتآكل حجارة الحوض.

## II-3-2-5- الحمامات الكبرى

يرجع بناء الحمامات الكبرى إلى منتصف القرن الثاني الميلادي (161-192م) في عهد الإمبراطور كومود<sup>(4)</sup>، تتربع على مساحة أكثر من 2600 م<sup>2</sup>، هي عبارة عن مجمع متكامل متناظر حول محور رئيسي، يضم العديد من القاعات، أهمها قاعة تغيير الملابس (Apodyterium)، وقاعة الألعاب الرياضية، وغرفة جافة (Laconicum)، وقاعة رطبة

(1)-Anne marie Leydier-Bareil, les arc de triomphe dediesa Caracalla en afrique romaine, Thèse de doctorat en histoire de l'art et archéologie, université Nancy2, France 2006,p262.

(2) -Berque Jacques, Op.cit,p19.

(3)-حجاج كهيبة، طرق تموين مدينة كويكول ( جميلة) بالمياه في العهد الروماني " دراسة وصفية معمارية "، رسالة ماجستير، جامعة الجزائر 02، 2010، ص 44.

(4) - زكي بوزيد، مرجع سابق، ص 179

(Sudatorium)، كما تضم أيضا قاعة باردة (Frigidarium)، وقاعة دافئة (Tepidarium)، وقاعة ساخنة (Caldarium)، وثلاثة مسابح، ولتسخين المياه استخدم نظام الهيبوكوست (Hypocaust)<sup>(1)</sup>، أما بخصوص مواد بنائه فقد استخدمت الحجارة الكلسية الصلبة في الجدران الخارجية، والآجر في العوارض والزوايا كونها تقاوم الحرارة والرطوبة، كما استخدمت حجارة "التوف الكهفي" في الأسقف الداخلية والأقواس لخفة وزنها، ولإعطاء فخامة للحمام غطيت جدران بعض القاعات بصفائح من الرخام الملون، أما الأرضيات فزينت بالفسيفساء، أما بخصوص حالة حفظها فهي متدهورة نوعاً ما، فقد تعرض المعلم لمجموعة من الأضرار لم يبق منه إلا بعض الجدران والأقبية، والأقواس، والتي حجارتها تظهر مظاهر تلف مختلفة تدل على تعرضه عبر تاريخه للعديد من عوامل التلف الطبيعية والبشرية.

#### II- 2-3-6- بيت باخوس

يحتل بيت باخوس موقعاً مميزاً، يتواجد بالقرب من الحمامات الكبرى، أما تاريخ بنائه فيعود إلى نهاية القرن الثاني ميلادي<sup>(2)</sup>، تبلغ مساحته حوالي 7000 متراً مربعاً، يتألف المنزل من بهو واسع وباحة داخلية وغرفتين كبيرتين، يمكنه أن يستقبل عدداً كبيراً من المحبين للإله باخوس\* من مختلف الطبقات الإجتماعية، كما جهز المنزل بمسبح ومراحيض وحدائق، وقد زينت فضاءاته بالفسيفساء التي تحمل مشاهد للصيد للإله باخوس<sup>(3)</sup>، حيث بعض من هذه الفسيفساء محفوظة حالياً بالمتحف المتواجد بالموقع الأثري.

#### II 2-4- الحي المسيحي

لقد خلفت الفترة المسيحية في القرن الرابع الميلادي ما يعرف بالحي المسيحي، الذي يتواجد في قمة الجزء الجنوبي الشرقي للمدينة، وهو يحتوي على ثلاثة كنائس ومعمودية مع مساكن لرجال الدين، وهي عبارة عن مجموعة دينية أنجزت لعبادة ونشر المسيحية، وقد عثر على تسجيل يفيد بأن المدينة كانت تحت الحكم الروماني حتى عام 476 م<sup>(4)</sup>.

(1)- Février Paul-Albert, Op.cit ,pp 49 ,67

(2)- Ibid , p 73.

(3)-Esméralda de Luis ,Op.cit.p11.

\* سمي المنزل بباخوس نظراً لوجود فسيفساء تحمل صورة الإله باخوس إله الخمر أنظر:

Blanchard- Lemée (M) : La maison de Baccus a Djemila, bulletin archéologique du C.T.H.S,Paris ,1984.

(4)- Esméralda de Luis , Op.cit.p11.

## II-4-2-1- الكنيسة القديمة الشمالية

تعرف أيضاً باسم البازليك الشمالية، اكتشفت خلال الفترة الممتدة بين 1912 و1921م<sup>(1)</sup>، يرجح أنها شيدت في أواخر القرن الرابع وبداية القرن الخامس الميلادي، ثم توسعت لاحقاً في العهد البيزنطي<sup>(2)</sup>، تقع هذه الكنيسة في الشمال الشرقي للمجموعة الدينية، تتجه نحو الشرق، الكنيسة مجهزة بثلاثة أبواب، مدخلها المركزي في الواجهة الأساسية، أما المداخل الأخرى فتوجد في الزاوية الغربية والشرقية<sup>(3)</sup>، تم انجاز الكنيسة من بقايا بناء آخر، في حين أرضيتها زينت بالفسيفساء التي تم نقلها أثناء التنقيب إلى المتحف المتواجد بالموقع.

## II-4-2-2- البازليك الجنوبية

اكتشفت البازليك الجنوبية سنة 1912م<sup>(4)</sup>، تعرف أيضاً باسم بازليك كروسكنيوس أما تاريخ بنائها فيرجع إلى الفترة ما بين (421 و420 م)، وقد أنجزت لحفظ الآثار المسيحية المقدسة في المنطقة، وخصصت أيضاً لتكون بمثابة كنيسة للإحتفال بالدفن المقدس<sup>(5)</sup>، تحتل الجهة الجنوبية الشرقية للمجموعة الدينية للحي المسيحي، أما حالة حفظها فهي متدهورة جداً لم يبق منها إلا بعض الأعمدة.

## II-4-2-3- المعمودية

اكتشفت هذه المعمودية سنة 1922م، وهي تقع في الركن الشمالي الغربي للمجموعة الدينية، يعود تاريخها للقرن الرابع الميلادي، تعتبر من المعموديات الأكثر اكتمالاً في شمال إفريقيا، تتوافق مع التقاليد القديمة ومتطلبات التعميد، ذات شكل دائري، يعد تصميمها كحمام حقيقي يكاد يكون الأكثر حداثة في تلك الفترة<sup>(6)</sup>، وقد شيدت بالكامل بجدران سميقة من الحجر المملوء من الخارج، وبجارية من التوف الكهفي من الداخل، أرضيتها بلطت بالفسيفساء المزخرفة باستثناء حوض المعمودية الذي تظهر فيه رموز دينية وهو مخصص لاستقبال المقبلين على التعميد للدخول في المسيحية.

(1) - Monceaux Paul , Découverte d'un groupe d'édifices chrétiens à Djemila, comptes rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, 66e année, N.5,1922, PP 380,407.

(2) - Allais Yvonne, le quartier occidental de Djemila (Cuicul) In Antiquités africaines, 1971, P103.

(3) - Monceaux Paul. Op.cit, PP386-.387.

(4) - Ibid,PP 391-392

(5) – Duval Noël ,Op.cit , p 7

(6) - Monceaux Paul ,Op cit, P 400.

### III- الخلاصة

تُعد المدينة الأثرية لجميلة من أهم المواقع القديمة التي تزخر بها الجزائر، وهي تقع في شمالها الشرقي، بالضبط بولاية سطيف، كانت تسمى كويكول قديماً، يغلب على تضاريسها الطابع الجبلي مما منح أرضيتها طوبوغرافية غير مستوية منحدره بميل يتعدى 25%، والتي تحكمت في مخطط وتوسع هذه المدينة باتجاه شمال جنوب، فضلاً عن منحها ثروة مائية هامة عبارة عن مجموعة من الأودية أهلتها لتكون مقر للإستيطان البشري منذ القدم، لذا نجد الموقع الأثري لجميلة يحده من الغرب واد قرقور، أما من الشرق فنجد واد بيطام.

كما أنّ تواجد المدينة في منطقة جبلية تتميز بتكوين جيولوجي مميز غني بالصخور الكلسية جعلها المادة الأساسية المستخدمة في تشييد معالم هذه المدينة، فضلاً عن ذلك، فالمنطقة تعرف مناخاً شبه قاري، حاراً وجافاً صيفاً، بارداً وممطراً شتاءً، مما جعلها عرضة لمختلف عمليات التآف المناخية والطبيعية في مقدمتها الجليد، والدليل على ذلك تلك النتائج المقدمة من طرف الديوان الوطني للأرصاد الجوية.

تشبه جميلة من حيث تخطيطها نظام المدن الرّمانية السائد آنذاك، وهي تتألف من مجموعة من المعالم شيّدت عبر تاريخها الطويل أبرزها قوس كركلا، والمعبد السيفيري، والحمامات الكبرى، والنّافورة المخروطية، إلى جانب السّاحة الجنوبية التي تقع في مدخل الموقع وغيرها من المباني العامة والخاصة التي تحكي في صمت تاريخ المدينة، والتي تعتبر ثروة لا تقدر بثمن، حيث جلبت اهتمام كثير من الباحثين الأجانب للتعرف على تاريخها وعلى طبيعة مواد بنائها وتقنيات بنائها، إلى جانب مصدر مواد بنائها الذي يعد من المواضيع الهامة في مجال صيانة وترميم الآثار.

## الفصل الثاني:

# عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### I- عموميات حول الحجارة

لا شك أنّ الحجارة على اختلاف أنواعها تعد من أهم مواد البناء الطبيعية التي استخدمها الإنسان منذ القدم، كانت في الماضي تمثل العنصر الإنشائي الأساسي للعديد من المباني لصلابتها ومتانتها، وقبل التطرق إلى مواد بناء الموقع الأثري لجميلة وتقنيات بنائه ارتئينا التّطرق أولاً إلى المفاهيم العامة عن الصّخور وأهم أنواعها وخواصها.

#### I-1- مفهوم الصّخور

تُعتبر الصّخور أكثر المواد انتشاراً على سطح الأرض، وهي من أولى المواد التي استخدمها الإنسان منذ العصور القديمة في أغراض البناء، أما بخصوص تعريفها فقد اختلف العلماء في وضع تعريف موحد لها، إذ نجد من يعتبرها بأنها كتلة طبيعية غير حية قد تكون معدنية أو شبه معدنية أو زجاجية أو من بقايا حية، وبهذا يكون الفحم والإسفلت من الصّخور<sup>(1)</sup>، وهناك من يعتبرها عبارة عن مجموعة من الفلزات البلورية أو اللابلورية، قد تتألف من فلز وحيد أو من مجموعة متنوعة من العناصر الفلزية<sup>(2)</sup>.

وبشكل عام، يمكن القول بأنّ الصّخور عبارة عن كتلة طبيعة غير حية، قد تتكون من فلز وحيد، أو من مجموعة من الفلزات، قد تكون بلورية أو غير بلورية، كما تتميز بخصائص متعددة حسب نوع الصّخر وطريقة تكوينه وطبيعة مكوناته الفلزية.

#### I-2- أنواع الصّخور

تُعد الصّخور على اختلاف أنواعها الوحدة البنائية للقشرة الأرضية، وللتمييز بينها نظراً لتنوعها واختلاف خواصها الفيزيائية والكيميائية فضلاً عن الميكانيكية، فقد قسمها علماء الجيولوجيا إلى ثلاثة عائلات رئيسية وذلك طبقاً لظروف نشأتها وأماكن تكوينها إلى:

- صخور نارية؛

- صخور رسوبية؛

- صخور متحولة.

(1)- محمد صفي الدين، قشرة الأرض دراسة مورفولوجية، الطبعة 2، دار الطباعة الحديثة، مصر، 1965، ص40.

(2)- ليون موريه، ترجمة يوسف خوري، عبد الرحمان حميدة، الوجيز في الجيولوجيا، الطبعة الأولى، دار طلاس، دمشق،

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

وكل عائلة ترتبط بالأخرى من خلال العمليات التي تحدث، سواء داخل طبقات الأرض أو على مستوى سطحها (1)، كما أشاروا إلى أنّ الصّخور النّارية تمثل الجزء الأكبر من حجم القشرة الأرضية بنسبة قد تصل إلى 95%، بينما الصّخور الرسوبية لا تمثل سوى نسبة 05 % فقط، أما من حيث الإنتشار على سطح الأرض، فالصّخور الرسوبية تحتل المساحة الأكبر بحوالي 75%، بينما الصّخور النّارية لا تشغل إلاّ نسبة 25% فقط (2).

### I-2-1- الصّخور النّارية

هي الصّخور التي تتكون من تبرّد الصّهير الأولي الساخن الذي يعرف "الماجما" إما في أعماق الأرض، أو فوق سطحها، وهي تعدّ أولى الصّخور تشكّلاً قبل الأنواع الأخرى التي تتشكّل لاحقاً انطلاقاً من هذه الصّخور، لذا يعتبرها الجيولوجيون مادة الأصل أو الأم للصّخور المتشكلة لاحقاً، ويطلقون عليها مصطلح الصّخور الأولية (3).

### I-2-1-1- أنواع الصّخور النّارية

يرجع أصل الصّخور النّارية للمادة المنصهرة الموجودة في جوف الأرض، والتي ينتج عند تبردها أنواع متعددة من الصّخور النّارية، ينفرد كل نوع منها بتكوين وخصائص، وللتمييز بينها يتم تقسيمها وفق عدة تصنيفات، أبرزها تصنيف يعتمد على طبيعة تكوينها المعدني، وتصنيف آخر يعتمد على المكان الذي تشكّلت فيه.

#### أ- تصنيف الصّخور النارية وفق أماكن تشكّلها

يعتمد هذا التّصنيف على المستوى الذي تصلبت فيه المادة المنصهرة، لأنّ هذه الأخيرة تفقد حرارتها ولزوجتها في كل مرحلة من مراحل صعودها لسطح الأرض، إذا تصلبت في باطن الأرض يتشكّل عندها صخر ناري جوفي أو داخلي، أما إذا اندفعت المادة المنصهرة إلى سطح الأرض وتصلبت فتنحدر عندها لصخر ناري سطحي (4).

(1)-إدوار جي تاريوك وآخرون، ترجمة محمود محمد الوحيدي، الأرض مقدمة في الجيولوجيا الفيزيائية، العبيكان، المملكة العربية السعودية، 2010، ص 29.

(2)- محمد صفي الدين، مرجع سابق، ص 53.

(3)-محمد عبد الهادي، دراسة علمية في ترميم وصيانة الآثار غير العضوية، مكتبة زهراء الشرق، مصر، ب ت، ص 74.

(4)-محمد رضا على إبراهيم، الجيولوجيا (علم الأرض)، رؤية عميقة لموضوعات علم الجيولوجيا في مقرر التعليم العام،

مكتبة، القاهرة ب ت، ص 49.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### - الصّخور النَّارية الدّاخلية (الجوفية)

هي صخور تشكّلت من تبلور الصهارة في أعماق الأرض، تكون هذه الصّخور الجوفية جيدة التّبلور وذات نسيج خشن، لأنّ الانخفاض التّدرجي لحرارة الصهارة يعطي للبلورات المتكونة أولاً الوقت الكافي للنمو تدرجياً ليصل قطرها إلى عدة مليمترات، ويطلق على هذه الصّخور الجوفية بالصّخور البلوتونية (Plutonie) نسبة لبلوتو (Pluto) إله عالم ما تحت الأرض عند الإغريق (1).

كما تنقسم الصّخور الجوفية بدورها وفق العمق الذي تشكّلت عنده إلى صخور جوفية عميقة إذا تصلبت في أعماق الأرض، أو إلى صخور جوفية سطحية إذا تصلبت في مستوى قريب من سطح الأرض، ومن الأمثلة على هذا النوع من الصّخور الجرانيت، والجابرو (2).

### - الصّخور النَّارية السّطحية أو الإندفاعية (البركانية)

تتشكّل هذه الصّخور نتيجة خروج الصّهارة لسطح الأرض من خلال الشقوق الموجودة في القشرة الأرضية، ويطلق عليها عندئذ باللابّة، وعند اتصالها بالهواء الجوي تبرد وتتجمّد مباشرةً وبسرعة كبيرة جداً، بحيث لا تجد البلورات المتكونة الوقت الكافي للنمو والكبير، وبذلك تتألف بلورات دقيقة لم تتبلور جيداً مشكّلةً صخراً نارياً سطحياً دقيق التحبّب (3)، كما يطلق على هذه الصّخور أيضاً مصطلح الصّخور البركانية نسبة إلى إله النَّار عند الرومان فولكان (4).

ومن أبرز مميزات الصّخور النَّارية الدّاخلية والسّطحية أنها متماثلة في التّركيب لكنها مختلفة في النّسيج فقط، فعلى سبيل المثال، البازلت صخر مندفع تكون من لابة يتميز بنسيج دقيق، أما الجابرو فيتشكّل في أعماق الأرض، وهو يمتلك نسيجاً خشناً، إلا أنّها لديهما نفس التّركيب المعدني.

(1)- إدوار جي تاريوك، مرجع سابق، ص 110.

(2)- محمد صفي الدين، مرجع سابق، ص 56.

(3)- محمد أحمد حسن هيكل، عبد الجليل عبد الحميد هويدي، أساسيات الجيولوجيا الفيزيائية، مكتبة الدار العربية للكتاب، 2008، ص 49.

(4)- إدوار جي تاريوك، مرجع سابق، ص 110.



## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

أما السمات المشتركة للصخور النارية السطحية فتتمثل في وجود فراغات شبه كروية تركتها الغازات المتحررة خلال تصلب اللابة، يطلق على هذه الفراغات مصطلح الفقاعات<sup>(1)</sup>، تكون هذه الفراغات بمثابة عيوب في التكوين الأولي للصخور، وهي تؤثر بشكل كبير على درجة صلابتها ومقاومتها لعوامل التلف المختلفة.

### ب- تصنيف الصخور حسب التركيب المعدني (محتوى السليكا)

يصنف الجيولوجيون الصخور النارية حسب محتوى السليكا إلى ثلاثة أنواع:

#### - صخور نارية حامضية (حمضية)

تعرف الصخور النارية التي تغلب فيها نسبة السليكا بالصخور السيليسية أو الحمضية<sup>(2)</sup>، وهي تحتوي على نسبة عالية من السليكا تتراوح من 65% إلى 80%، مع نسب قليلة من الحديد والمغنيزيوم، وعادةً ما تتميز بألوان فاتحة وبقلة كثافتها مقارنة مع الصخور القاعدية، ويرجع اللون الفاتح إلى انخفاض نسب كل من الحديد والمغنيزيوم<sup>(3)</sup>، ومن أهم أنواع هذه الصخور نجد الجرانيت، وصخر أبلات، والريولايت.

#### - صخور نارية وسيطة (معتدلة)

تحتوي هذه الصخور على نسب متوسطة من السليكا إلى جانب الحديد والمغنيزيوم، تكون فيها نسبة السليكا تتراوح بين 55% إلى 65%<sup>(4)</sup>، تتميز بألوان وسطية بين الغامق والفاتح، لكنها أشد قمامة من الصخور الحمضية<sup>(5)</sup>، ومن أبرز هذه الصخور، الديوريت.

#### - الصخور النارية القاعدية (قلوية)

هي صخور تتراوح فيها نسبة السليكا بين 45% و 55%، وترتفع فيها نسب كل من الحديد والمغنيزيوم، فضلاً عن ذلك، فهي تمتاز بكثافة عالية وألوان قاتمة مائلة إلى السواد

(1)- المرجع نفسه، ص 113.

(2)- محمد عبد الهادي محمد، مرجع سابق، ص 76.

(3)- محمد صفى الدين، مرجع سابق، ص 56.

(4)- المرجع نفسه، ص 57.

(5)- إبراهيم محمد عبد الله، ترميم الآثار الحجرية، دار المعرفة الجامعية، مصر، 2012، ص 14.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

نتيجة لإرتفاع نسب مركبات الحديد<sup>(1)</sup>، كما تتميز بمقاومة جيدة لعوامل التآكل أكثر من الصّخور الحمضية، ومن الأمثلة على هذه الصّخور، الجابرو، والبازلت.

### - الصّخور الفوق القاعدية

تتميز هذه الصّخور بنسبة منخفضة من السليكا تتراوح بين 5 % إلى 35 %، ومن أمثلة على هذا النوع من الصّخور السّرپنتين<sup>(2)</sup>، وهي بذلك تعد صخوراً ضعيفةً.

### I-2-1-2- التكوين المعدني أو الفلزي للصخور النارية

تتكون الصّخور النارية من قسمين من المعادن، أهم عناصرها السليكون والمغنيزيوم والحديد: القسم الأول من هذه المعادن يعرف بمجموعة المعادن الأساسية، وهي التي تدخل في تكوين أكثر من 95 % من مجموع المعادن المشكلة للصّخور النارية، والتي تلعب دوراً هاماً في تحديد نوع الصّخر وخصائصه، فضلاً عن لونه، كما تتميز هذه المجموعة بوجود نوعين من المعادن<sup>(3)</sup>:

- معادن فاتحة اللون: تتمثل في الكوارتز والفلسبار والميكا البيضاء، إلى جانب احتوائها على نسبة عالية من السليكات، تتراوح نسبها بين 65 و 85 %، مع نسب قليلة من الحديد والمغنيزيوم.

- معادن داكنة اللون: مثل الأوليفين والأمفيبول والبيركسين والبيوتيت (الميكا)، وهي تحتوي على نسب مرتفعة من الحديد والمغنيزيوم تتراوح ما بين 60 و 80 %، ونسب قليلة من السليكون.

كما يطلق على المعادن الفاتحة اللون اسم السليكات الفاتحة اللون أو السليكات غير الحديدومغنيزية، والتي تحتوي على كميات كبيرة من البوتاسيوم والصوديوم والكالسيوم بدلاً من الحديد والمغنيزيوم، أما المعادن القاتمة اللون فيطلق عليها اسم السليكات الحديدومغنيزية أو السليكات الداكنة<sup>(4)</sup>.

(1)- محمد صفى الدين، مرجع سابق، ص 58.

(2)- المرجع نفسه، ص 58 .

(3)- محمد رضا على إبراهيم، مرجع سابق، ص 50.

(4)- إدوار جي تاريوك، مرجع سابق، ص 110.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

أما القسم الثاني من المعادن فلا تشكّل نسبتها إلا 05% من مادة الصخر، وتعرف بمجموعة المعادن الثانوية، مثل الأباتيت، الهيماتيت والبيريت<sup>(1)</sup>.

### I-2-1-3- خصائص الصّخور النّارية

- تتميز الصّخور النّارية بجملة من الخصائص والمميزات، يمكن إجمال أهمها فيما يلي:
- تعد الصهارة مادة الأصل التي تتكون منها الصّخور النّارية؛
  - توجد غالباً في صورة متبلورة، حيث يشكل معدن السليكات النسبة الأكبر في تكوينها؛
  - تتميز بأنها أكثر صلابة، وأنها ذات مقاومة عالية لعوامل التعرية والتلف؛
  - توجد على شكل كتلة صخرية واحدة خالية من الطبقات؛
  - لا تحتوي على بقايا كائنات حية (أحافير)؛
  - مادة غير مسامية وغير نفوذة لا تسمح بمرور الماء من خلالها إلا بصعوبة؛
  - تتميز الصّخور النّارية الجوفية بنسيج خشن وتبلور جيد، أما الصّخور النّارية السطحية أو المندفعة فتتميز بنسيج ناعم وتبلور غير جيد.

### I-2-1-4- ألوان الصّخور النّارية

تكمن أهمية خاصية اللون كونها تساعد على التعرف على نوعية المعادن الأساسية التي تتكون منها الصّخور النّارية، إلى جانب تحديد نوعية وخواص ومكونات الصّهير الذي تشكّلت منه، أما لونها فيتوقف على ما تحتويه من معادن الفلسبار، وهذا ما يجعلها تأخذ إحدى الألوان أو الأشكال الثلاثة<sup>(2)</sup>:

#### أ-صخور نارية فاتحة اللون

تتألف الصّخور النّارية فاتحة اللون من المعادن الأساسية مثل الكوارتز والفلسبار (الفلدسبار)، والميكا البيضاء، إذ تزيد فيها نسب السيليكا عن نسب الحديد والمغنيزيوم، فعلى سبيل المثال، الصّخور النّارية التي تحتوي على الكوارتز والفلسبار التي ترجع إلى صهير حامض يحتوي على نسبة عالية من السليكون، وبهذا يغلب عليها اللون الفاتح.

(1)- محمد رضا على إبراهيم، مرجع سابق، ص50.

(2)- محمد عبد الهادي محمد، مرجع سابق، ص 78.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### ب-صخور نارية قاتمة اللون

تكون هذه الصّخور قاتمة اللون، فهي تتألف من معادن قاتمة اللون التي ترجع إلى الصّهير البركاني القاعدي الذي يحتوي على نسب عالية من الحديد والمغنيزيوم، مع نسب قليلة من السليكون، ما يعطيها اللون القاتم مثل البازلت.

### ج-صخور نارية متوسطة اللون

تتميز بعض الصّخور النارية بلون وسطي بين الفاتح والقاتم، يرجع مصدرها إلى الصّهير المتوسط الحامضية، الذي تتساوى فيه نسب كل من عناصر السليكون والحديد والمغنسيوم، مثل الديوريت.

### I-2-1-4-نسيج الصّخور النارية

يُعد النسيج من أهم خصائص الصّخور النارية، فهو يعبر عن مظهرها العام من حيث درجة تبلورها وشكل وحجم بلوراتها وعلاقتها ببعضها (1)، فضلاً عن أنه خاصية مهمة تكشف تفاصيل كثيرة عن البيئة التي تشكّلت فيها هذه الصّخور، كما تدل على مصدر الصّخر، فضلاً عن خصائصه، وعمق المكان الذي تجمّدت فيه الصّهارة وسرعة التبريد (2).

### I-2-1-4-العوامل المؤثرة في أنسجة الصّخور النارية

بشكل عام توجد ثلاثة عوامل تساهم في تكوين أنسجة الصّخور النارية (3):

#### أ-معدل تبريد الصّهارة

يقصد به المعدل الذي تتبرد عنده الصّخور المنصهرة، فالنّبرد البطيء يؤدي إلى نمو البلورات بحجم كبير ذات نسيج خشن، في حين النّبرد السريع يؤدي إلى تكوين بلورات صغيرة الحجم ذات نسيج دقيق زجاجي.

#### ب-كمية السليكا الموجودة

تؤثر كمية السليكا الموجودة في الصّهارة على درجة لزوجتها، وبالتالي على تكوين البلورات، لأن اللزوجة العالية للصّهارة الغنية بالسليكا تعيق تحرك الأيونات إلى مواقع التبلور وبذلك تمنع تكوين البلورات.

(1)-محمد رضا على إبراهيم، مرجع سابق، ص51.

(2)- إدوار جي تاربيوك، مرجع سابق، ص112.

(3)-المرجع نفسه، ص112.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### ج-كمية الغازات الذائبة في الصهارة

تحتوي الصهارة على كمية من الغازات تتراوح من 1 إلى 5 % من وزنها، حيث تزداد سرعة انسيابها وتحركها مع ازدياد نسبة الغازات فيها، فعندما تصعد الصهارة لأعلى يقل تأثير الضغوط عليها فتتحرر تلك الغازات منها إما بهدوء أو على شكل انفجارات، لذا نجد أحياناً صخور نارية تحتوي على فراغات على شكل فتحات كروية أو مستطيلة ناتجة عن عملية خروج الغازات من الصهارة عند تبلورها.

### I-2-4-1-2- أنواع أنسجة الصخور النارية

تصنّف الصّخور النّارية حسب درجة تبلور المعادن المتكونة منها إما كاملة التّبلور إذا تكونت كلياً من مادة متبلورة، أو كاملة الزجاجية إذا تكونت كلياً من الزجاج، أو ناقصة التّبلور إذا احتوت على بلورات وزجاج معاً، وبشكل عام تُصنّف هذه الصّخور على أساس طبيعة تركيبها المعدني ونسيجها ولونها إلى عدة أنواع كما هو مبين في الشكل رقم (7).

لون صلب	مافى (باتلتي)	مافى (باتلتي)	وسطى (أنديزيتي)	جرانيت (فلسي)	التركيب الكيمياءني
أوليفين بيروكسين	بيروكسين كفسبار بلاجوكليز فلسي	كفسبار البلاجوكليز القلي بالأمفيبول والصوديوم والكالسيوم	كفسبار كوارتز كفسباريوتا كفسبار صوري	المعادن الشائعة	
كفسبار بلاجوكليز الفلسي	المفيبول الوليفين	بيروكسين بيوتايت	المفيبول موسكوفيت بيوتشمس	معادن ثانوية	
البريدوتيت	الجابرو	الدبوريت	الجرانيت	المرعي الخشن العبيبات	
الكوماتيت (التنخر)	الهازلت	الإنديزيت	الريولايت	الأقليات غير المرعي القاع العبيبات	
غير شائع	«البوفيري» يسبق أياً من الأسماء المذكورة أعلاه، كلما وجدت بلورات واضحة.			البورفير	
	أوبسيدين (الزجاج المضغوط) الخفاف (بيوس) (زجاج رقيق)			الزجاجي	
	التف (نظائماً أقل من 2 ملم) البريشا البركاتية (نظائماً أكبر من 2 ملم)			الخطامي	
100% إلى 85%	45% إلى 85%	25% إلى 45%	0% إلى 25%	لون الصلبر بناءً على النسبة المئوية للمعادن الشائعة	

الشكل رقم 7: يبين تصنيف الصّخور النّارية على أساس التّركيب المعدني والنّسيج واللّون (1)

(1) - المرجع نفسه، ص 115.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

ويمكن إجمال أهم أنواع أنسجة الصّخور النَّارية ومميزاتها في الجدول رقم (7).

نوع النسيج	المميزات	كيفية التكوين	نوع الصخر	الصورة
نسيج دقيق التبلور ناعم الحبيبات الأفانيت	- تكون بلورات دقيقة جداً بحيث لا يمكن تمييز المعادن إلاً بالمجهر.	تتكون على سطح الأرض أو بالقرب منه حيث يكون التبريد سريعاً نسبياً.	-البازلت -الفلسيت	
النسيج المرئي الخشن (خشن التبلور أو خشن الحبيبات)	- بلورات كبيرة متساوية في الحجم تقريباً. - يمكن رؤيتها بالعين المجردة أو بالعدسة.	تتشكل عند تبلور الصهارة في أعماق الأرض، إذ يسمح التبريد البطيء بنمو البلورات.	- الجرانيت - الجابرو	
النسيج الخشن الدقيق البورفيرى	-بلورات معدنية خشنة وكبيرة محاطة ببلورات صغيرة ناعمة.	ينتج عندما تنتقل الصهارة التي تحتوي على بعض البلورات الكبيرة التي تشكلت أولاً في باطن الأرض إلى موقع جديد فوق سطح الأرض أو قريبة منه حيث يتزايد معدل التبريد.	-الجرانيتية -البورفيرية	
النسيج الزجاجي	لا توجد بلورات	ينتج عند التبريد السريع للصهارة، فلا تجد البلورات الوقت الكافي لتنظم في شبكة بلورية	-الأوبسيديان -(السبج) -الخفاف -اليوميس	



## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

	<p>التّف الملتحم</p>	<p>تتكون من دمج وتلاحم وتصلب الفتات والشظايا لصخور مندفعة خرجت خلال ثوران بركاني عنيف.</p>	<p>نسيجها يشبه الصّخور الرّسوبية أكثر من الصّخور النّارية، عبارة عن طبقات من الحبيبات والشّظايا.</p>	<p>النّسج الحطامي أو الفتاتي الناري</p>
	<p>السّيانيت</p>	<p>ينتج عن التّبرّد السّريع وتجمد الحمم البركانية الغنية بالسّليكات حيث تحجز الغازات في داخلها وتسمح للغازات القريبة من السّطح بالتحرر تاركاً ورائها فراغات في الصّخر.</p>	<p>بلورات دقيقة محاطة بفجوات بسب خروج فقاعات الغازات عند تصلب الصّهارة</p>	<p>النّسج الفقاعي</p>

الجدول رقم 7: يبين أهم أنواع أنسجة الصّخور النّارية ومميزاتها (1)

### I- 2-2- الصّخور المتحوّلة

تنشأ الصّخور المتحوّلة نتيجة تعرض الصّخور المتكونة سابقاً (الصّخور النّارية و/أو الرّسوبية أو المتحوّلة)، والتي تعرف بصخور الأم أو الأصلية الموجودة في أعماق الأرض لعوامل مختلفة، من أهمها قوى الصّغظ العالي، وتأثير درجات الحرارة المرتفعة، إلى جانب المحاليل الكيميائية النشطة، والتي تؤدي في النهاية إلى إعادة بنائها على هيئة صخور جديدة، يطلق عليها الصّخور المتحوّلة، حيث تتميز بخصائص تختلف عن تلك الموجودة في صخور الأم، ويُعد مصطلح كلمة المتحوّلة الاسم الأنسب كونه يعني حرفياً شكل التغيّر (2).

(1)-إدوار جي تاريوك، المرجع نفسه، ص112.

(2)- المرجع نفسه، ص115.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### I-2-2-1- العوامل المؤثر على تحوُّل الصَّخور المتحوّلة

ترتبط ظاهرة تحوُّل الصَّخور بجملة من العوامل التي قد تعمل منفردة أو مجتمعة لتشكّل في النهاية أنواعاً مختلفةً من الصَّخور المتحوّلة، ومن أهم هذه العوامل نذكر:

#### أ- عامل الحرارة

تعمل الحرارة المرتفعة على رفع درجة حرارة الصَّخور وتليينها لنقطة الإنصهار لتتجمع في شكل مادة منصهرة (الصَّهارة)، فعند انخفاضها تتشكّل كتل كبيرة ملتهبة، والتي قد تندفع بسبب الضَّغط وتقتحم الصَّخور التي تعلوها، والتي تعرف بالصَّخور المضيفة قد تكون متحوّلة أو رسوبية<sup>(1)</sup>، وتشكّل الحرارة مصدراً للطاقة الذي يحفز التفاعلات الكيميائية، فضلاً على إذابة وإعادة تبلور المعادن الموجودة في الصَّخور وتكوين معادن جديدة<sup>(2)</sup>، وللإشارة فإن الإرتفاع في درجة الحرارة يتعلق بالعمق إلى جانب القرب من الصَّهارة، حيث ترتفع كلما زاد العمق بواقع 30°م لكل واحد كيلومتر كما هو مبين في الشكل رقم (8)<sup>(3)</sup>.

#### ب- عامل الضَّغط

يتولد الضَّغط باشتراك مجموعة من القوى الموجودة داخل الأرض الناتجة أساساً إما من زيادة ثقل الرواسب أو الصَّخور حسب العمق، و/أو بفعل ضغط المحاليل المتحركة داخل الصَّخور، أو نتيجة الحركات الأرضية الجانبية، أو بفعل الحرارة، وبشكل عام، نميز وجود نوعين من الضَّغوط التي تؤثر على الصَّخور المتحوّلة<sup>(4)</sup>:

- **الضَّغط المحيطي المنتظم:** يكون هذا الضَّغط متساوياً، فالصَّخور المتشكّلة بفعله تمتلك تركيباً حبيبياً غير منتظم، مع معادن ذات كثافة، كما تتميز بتركيب طبقي أو صفائحي، فضلاً عن ذلك، فالضَّغط المحيطي يعمل على تغيير شكل وسمك الصَّخور.

- **الضَّغط الموجه أو الإتجاهي:** هو ضَّغط غير متساوي في مختلف الإتجاهات، يسمى بالإجهاد التفاضلي، حيث يؤدي إلى ترتيب حبيبات الصَّخر في اتجاه عمودي على اتجاه الضَّغط، لذا تتعرض هذه الصَّخور للطي أو التصدع.

(1)- المرجع نفس، ص 242.

(2)- براك مهدي براك، وآخرون، علم الأرض (الجيولوجيا)، كتاب المعلم الصف 11، الجزء الأول، المرحلة الثانية، الطبعة الأولى، دار التّربويون، الكويت، 2013، ص 77.

(3)- عبد المعز شاهين، ترميم وصيانة المباني الأثرية والتاريخية، مطابع المجلس الأعلى للآثار، مصر، 1994، ص 46.

(4)- المرجع نفسه، ص 46.



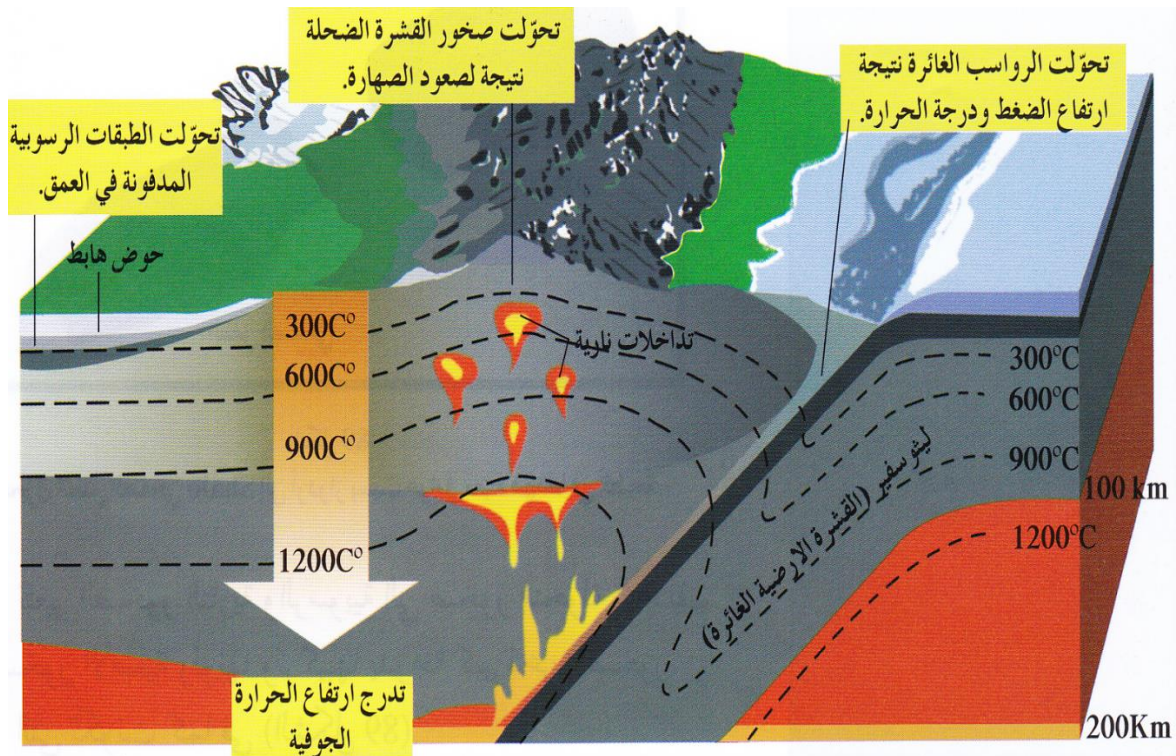
## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### ج- المحاليل أو السوائل الكيميائية

تُعد المحاليل الكيميائية من عوامل التحوُّل المؤثرة بشكل كبير، حيث تلعب دوراً أساسياً في تنشيط مختلف التفاعلات الكيميائية، فضلاً عن تحفيزها لعمليات إعادة تبلور المعادن، فعلى سبيل المثال وجود الماء يزيد من سرعة التبلور، ويعزز التفاعلات الكيميائية بين المعادن المكونة لصخور الأم، وذلك من خلال دخوله في التفاعلات ونقله للمركبات التي تحفز هذه التفاعلات الكيميائية (1).

### د- الزّمن

لا شك أنّ درجة التحوُّل وكماله يرتبط بشكل كبير بالمدة التي تبقى فيها الصّخور الأولية معرضة لعوامل التحوُّل، فكلما طال زمن التّعرض كان التحوُّل كاملاً وتاماً، وبذلك ينتج عنه صخور تامة التحوُّل، وكلما كان زمن التّعرض أقل كان التحوُّل غير تام، مما يُنتج عنه صخوراً غير تامة التحوُّل (2).



الشكل رقم 8: يبين العوامل المؤثرة على تحوُّل الصّخور المتحوّلة (3)

(1) - براك مهدي براك، مرجع سابق، ص 78.

(2) - المرجع نفسه، ص 77.

(3) - المرجع نفسه، ص 77.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### I-2-2-2-أنواع التحوُّل

يحدث التحوُّل في بيئات عديدة، وهو يرتبط بعوامل التحوُّل، إلى جانب القرب أو البُعد عن مكان تأثير هذه العوامل، والتي تؤدي في مجملها إلى أنواع مختلفة من التحوُّل:

#### أ-التحوُّل التماسي أو الحراري

يقصد به التحوُّل النَّاشئ عن درجات الحرارة المرتفعة في باطن الأرض بسبب تسرب كميات هائلة من الماغما، ويعرف هذا النوع من التحوُّل كذلك بالتحوُّل بالإتصال<sup>(1)</sup>، وهو تحوُّل يحدث بالتماس، أي عندما تُلامَسُ الصَّهارة المندفعة صخوراً أخرى عند اختراقها للقشرة الأرضية، حيث تؤدي الانفجاعات النَّارية إلى حرق الصَّخور المجاورة وتغيير طبيعتها وإعادة تبلورها.

ويطلق على المنطقة التي يحدث فيها التحوُّل بـ "هالة التحوُّل"، وهي منطقة التَّدخلات التي تكون عبارة عن غلاف يلتف حول الكتل النَّارية الدَّاخلية، ويطلق عليه بالسَّقْف المتدلي، لأنَّه كان في السَّابق سقفاً لتجويف الصَّهارة، حجم هذه الهالة يتأثر بحجم الصَّهارة وتركيبها المعدني، بالإضافة إلى وفرة المحاليل الحارة أو المياه السَّاخنة<sup>(2)</sup>، فعلى سبيل المثال يتحوُّل الكوارتز إلى صخر كوارتزيت، كما تتحوُّل الحجارة الطَّينية والطفلة إلى صخور صلبة جداً وناعمة الحبيبات يطلق عليها بصخور هورنفل، أما الصَّخر الرملي فينتج عنه صخر كوارتزيت، في حين الرِّخام ينتج عن تحوُّل الحجر الجيري.

#### ب-التحوُّل الحرماي

التحوُّل الحرماي هو تحوُّل كيميائي يحدث عندما تنتشر السوائل أو المحاليل السَّاخنة الغنية بالأيونات عبر شقوق ومسامات الصَّخور، هذا التحوُّل يرتبط بموقع الصَّهارة ومكوناتها (الصلبة، السائلة، الغازية)، فعندما تتصلب الصَّهارة تتحرر هذه السوائل الحارة الغنية بالسليكات وتنتقل إلى الصَّخور المضيفة، وينتج عنه انتشار للسوائل، حيث تترسب المواد الصلبة الموجودة في هذه المحاليل كالمعادن في شقوق وفواصل الصَّخور، أو تتفاعل

(1)- محمد عبد الهادي محمد، مرجع سابق، ص 79.

(2)- إدوار جي تاريوك، مرجع سابق، ص ص، 241-242.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

مع المكونات المعدنية للصخور المضيفة خاصة ذات النفاذية والقابلية للتفاعل، فيصاحبه تكوين مركبات معدنية جديدة، فعلى سبيل المثال عندما تتفاعل مركبات الحجر الجيري (الكالسيوم) مع المحاليل الحرمائية الغنية بالسليكات ينتج عنه معادن السليكات الغنية بالكالسيوم، ويظهر فعل هذا التحوّل الحرمائي جلياً في المناطق التي تتوفر على الينابيع الحارة أو الحمم النشطة في البحار والمحيطات، حيث تعمل الصهارة المتدفقة على تكوين قاع محيط جديد، وعندما يترشح الماء الحار من خلال القشرة المحيطة الجديدة الساخنة تتفاعل مع الصخور النارية المتشكلة حديثاً، مما يؤدي إلى تحوّل معادن الحديدو مغناطسية مثل الأولفين والبيلاوكسين إلى هيدرات السليكات كالسريت والكوريت والتالك، وأيونات الصوديوم الموجودة في ملح الطعام إلى أيونات الكالسيوم(1).

### ج- التحوّل في مناطق الدفن أو الطمر

يحدث هذا التحوّل عند اشتراك كل من الضّغط والحرارة الداخليّة التي تحفز إعادة تبلور المعادن الأصليّة محدثةً تغييراً في نسيج الصّخور، فضلاً عن ذلك، فإنّ الزيادة في سمك الترسّبات يدفع بالطبقات التي أسفلها للغوص أكثر في العمق، فيتداخل على إثره الغلاف الصّخري، ويطلق على هذه الظاهرة بالتحوّل في منطقة الطمر، بمعنى الانتقال من منطقة دفن ذات ضغط أقل إلى منطقة دفن أعرق ذات ضغط أقوى وحرارة أشدّ، ويعتمد حدوث هذا التحوّل على التدرج الحراري الذي يبدأ انطلاقاً من درجات حرارة قد تصل إلى 200°م، بالإضافة إلى العمق المطلوب لحدوث هذا التحوّل، والذي يختلف من موقع لآخر، قد يبدأ عند عمق يصل إلى حوالي ثمانية (8) كيلومترات تقريباً (2).

### د- التحوّل الإقليمي أو التحوّل الميكانيكي

يحدث التحوّل الإقليمي عندما تنحصر كتلة صخرية لينّة بين صفيحتين صخريتين أكثر صلابة منها، إذ تتقارب إحدهما إلى الأخرى، وتصبح الكتل الصخرية المتصادمة مطوية ومتصدعة، مما يؤدي إلى تقلصها وزيادة سمكها(3)، وبشكل عام فإن معظم الصخور

(1)- المرجع نفسه، ص242

(2)- المرجع نفسه، ص242

(3)- المرجع نفسه، ص224

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

المتحوّلة تتكون بواسطة هذا النوع من التحوّل، إذ ينتج عندما تتعرض طبقة صخرية غير متكافئة (صخر لين كالطين أو صلصال) تتوسط طبقتين متكافئتين من صخر أكثر صلابة كالحجر الجيري لإلتواء الصّخور الصّلبة وانشاء الصّخور اللينة نتيجة الضغوط الجانبية، والتي تستمر في الإنشاء بالإتجاه الذي تأتي منه الضغوط، فعلى سبيل المثال يتحوّل الصّخر الطيني إلى ما يعرف بالأردواز، كما تتميز الصّخور المتحوّلة إقليمياً بوجود ظاهرة التورق، وأسطح مستوية أو متموجة، والتي تنشأ عندما تؤثر قوة ضغط قوية ذات اتجاه محدد على صخر يعاد تبلوره، فيتكون عندها صخر متبلور بأنسجة اتجاهية، أما عند التحوّل بالتماس فيكون الضّغط عندئذٍ أقل أهمية<sup>(1)</sup>.

### I-2-2-3- التكوين المعدني للصخور المتحوّلة

تتميز الصّخور المتحوّلة بتكوين معدني متنوع، منها ما هو مشتق من صخور الأم، ومنها ما هو متكون جديد، ومن أهم المعادن التي تدخل في تكوين الصّخور المتحوّلة نجد<sup>(2)</sup>:

-معادن مشتقة من الصّخور النارية: مثل الفلسبار، والميكا، والهورنبلند، والكوارتز، والدولوميت، وغيرها من المعادن؛

-معادن تكونت حديثاً بفعل عمليات التحوّل مثل بعض أنواع الميكا، والكلوريت، والجاريت، والسرينتين وغيرها من المعادن؛

-المعادن الملونة مثل الهمايت، والمجنيتيت، والجرافيت، والأجيوكليز؛

- معادن سيليكات مميزة للصخور المتحوّلة فقط، مثل الكيانيت والأستوروليت وبعض أنواع الجاريت أو الغاريت.

وبما أنّ هذه المعادن لا توجد إلا في الصّخور النارية، فوجودها دليل على حدوث التحوّل، فعلى سبيل المثال الكالسيت يعتبر من المعادن الشائعة في الصّخور المتحوّلة.

(1)- محمد صفى الدين، مرجع سابق، ص71.

(2)- محمد عبد الهادي محمد، مرجع سابق، ص 81.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### I-2-2-4- نسيج الصّخور المتحولة

تتميز المعادن التي تتكون منها الصّخور المتحولة بشدّة تماسكها الداخلي، الأمر الذي يؤثر على طبيعة نسيجها، والذي يرتبط إلى حد كبير بأنواع المعادن وحجم بلوراتها ودرجة التبلور ذاتها، وعلى هذا الأساس يمكن التمييز بين أنواع النسيج في هذه الصّخور كما يلي (1):

#### أ- النسيج الدقيق جداً

يميز الصّخور التي تحتوي على صفائح الميكا والمعادن ذات نظام بلوري متوازن.

#### ب- النسيج الحبيبي

يحتوي النسيج الحبيبي على بلورات متساوية الأبعاد، ينتج عندما تتعرض الصّخور لضغوط متساوية من كل الإتجاهات، وتكون الأنسجة الحبيبية أكثر شيوعاً في الصّخور المتحولة بالتماس مثل الرّخام، وقد يظهر هذا النوع من النسيج في الصّخور المتحولة تحوّلاً إقليمياً عند درجة حرارة وضغط عالين، كما يميز الصّخور المتحولة التي تحتوي على معادن ذات حجم متساوٍ، كالمعان الموجودة في الرّخام، والكوارتزيت، والعديد من أنواع النيس الجرانيتي.

#### ج- النسيج البورفيرى

يشبه نسيج الجرانيت البورفيرى، حيث يتميز بوجود معادن ذات حجم صغير تحيط بمعادن ذات حجم كبير في الصّخور المتحولة.

#### د- النسيج التورقي

تعكس درجة التحوّل نسيج الصّخور وتجمع المعادن، فخلال عملية التحوّل يعاد بلورة بعض المعادن في اتجاه عمودي نحو القوة الضاغطة، وعليه فالنوع المعدني الناتج يكسب الصّخر في كثير من الأحيان مظهراً طبقياً يسمى بالنسيج التورقي، هذا النسيج التورقي لا يوجد إلا في الصّخور المتحولة التي تتكون من معدن واحد فقط، والتي تتصف بوجود

(1)- المرجع نفسه، ص ص 80، 81.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

بلورات متساوية الأبعاد ليست تورقية بشكل ظاهر، فعلى سبيل المثال عندما يتحوّل الحجر الجيري النقي فإن بلورات الكالسيت الصغيرة تتجمع لتشكّل بلورات متشابكة أكثر، والصخر الناتج يشبه الصخور النارية ذات الحبيبات الخشنة، وتسمى الصخور المتحولة غير التورقية الناتجة من الحجر الجيري بالرّخام<sup>(1)</sup>.

### I-2-2-5- خصائص الصخور المتحولة

لا شك أنّ الصخور المتحولة تتميز بجملة من الخصائص تميزها عن الصخر الأصلي يمكن إجمال أهمها فيما يلي:

- تكون أشدّ صلابة وأكثر تبلوراً، حيث تتوقف درجة صلابة هذه الصخور وتبلورها على العوامل الفيزيائية التي تتعرض لها أثناء عملية التحوّل<sup>(2)</sup>.

- تختلف عن الهيئة الأصلية، قد يكون تركيبها المعدني ذا معادن متبلورة، وأحياناً تحتفظ بالطبقات إذا كان أصلها رسوبي، ولكن إذا كانت درجة التحوّل شديدة فعندها تفقد الصخور كل معالمها الأصلية، كما أنها لا تحتوي على حفريات<sup>(3)</sup>.

- تتميز الصخور المتحولة التي تتعرض لضغوط متساوية بتركيب حبيبي غير منتظم، ومعادن عالية الكثافة، كما تتميز بتركيب طبقي أو صفائحي<sup>(4)</sup>.

يسبب التحوّل تغيرات عديدة في الصخور الأصلية، منها زيادة الكثافة، والتغيّر في حجم الحبيبات، وإعادة ترتيب الحبيبات المعدنية والنسيج، مما يُنتج صخوراً قد تختلف كلياً عن الصخر الأصلي، وذلك حسب نوع الصخر الأصلي، وبيئة التحوّل، ونوع العامل المؤثر، ويمكن إجمال أهم أصول الصخور المتحولة الشائعة ومميزاتها في الشكل رقم 9.

(1)- إدوار جي تارباك، مرجع سابق، ص 31.

(2)- محمد رضا على إبراهيم، مرجع سابق، ص 59.

(3)- عزت زكي حامد قادوس، علم الحفائر وفن المتاحف، مطبعة الحضري، الاسكندرية، 2008، ص 171.

(4)- عبد المعز شاهين، مرجع سابق، ص 46.



## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

اسم الصخر	النسيج	حجم الحبيبة	توضيحات	الصخر الأصلي
الأردواز	التلويق التلويق التلويق التلويق التلويق	ناعم جدًا	انقسام صخري كامل، أسطح ناعمة وباهتة	الطفل، أو الحجر الطيني، أو حجر الطمي
الغليبت		ناعم	ينحطم على طول الأسطح المتوجة، لامع براق	الطفل، أو الحجر الطيني، أو حجر الطمي
الشبست		متوسط إلى خشن	معادن المايكا بكثرة، التوزق العرشي	الطفل، أو الحجر الطيني، أو حجر الطمي
النايس		متوسط إلى خشن	يرجع الترابط التركيبي إلى انفصال المعادن	الطفل، أو الجرانيت، أو الصخور البركانية
المجماتيت		متوسط إلى خشن	يرجع الترابط التركيبي إلى انفصال المعادن	الطفل، أو الجرانيت، أو الصخور البركانية
المابونيت	التلويق التلويق	ناعم	عندما تكون الحبيبات الناعمة جدًا شبيهة بالصوان، فإنها تنكسر إلى ألواح غلثا	أي نوع من الصخور
كونفلوميرات متحول		خشن الحبيبات	حصى ممتد مع انفصال مفضل	صخر الكونفلوميرات القي بالمرو
الرخام	غير التلويق	متوسط إلى خشن	حبيبات الكالسيت، أو الدولوميت المتشابهة	حجر جيرى، دولوستون
كوارتزيت		متوسط إلى خشن	حبيبات المرو المتلاحمة، والضخمة، والصلبة جدًا	كوارتزيت
الهورنفل		ناعم	يكون للصخور الضخمة الداكنة، لمعان باهت	أي نوع من الصخور
الإنتراست	غير التلويق	ناعم	قد تظهر الصخور السوداء البراقة تكمزًا محاريًا	الفحم البتوميني
بريشا التصدع		متوسط إلى خشن جدًا	شظايا محطمة في ترتيب جزائي	أي نوع من الصخور

الشكل رقم 9: يبين أصل أهم الصخور المتحولة وأهم مميزاتاتها (1)

### I-2-3- الصخور الرسوبية

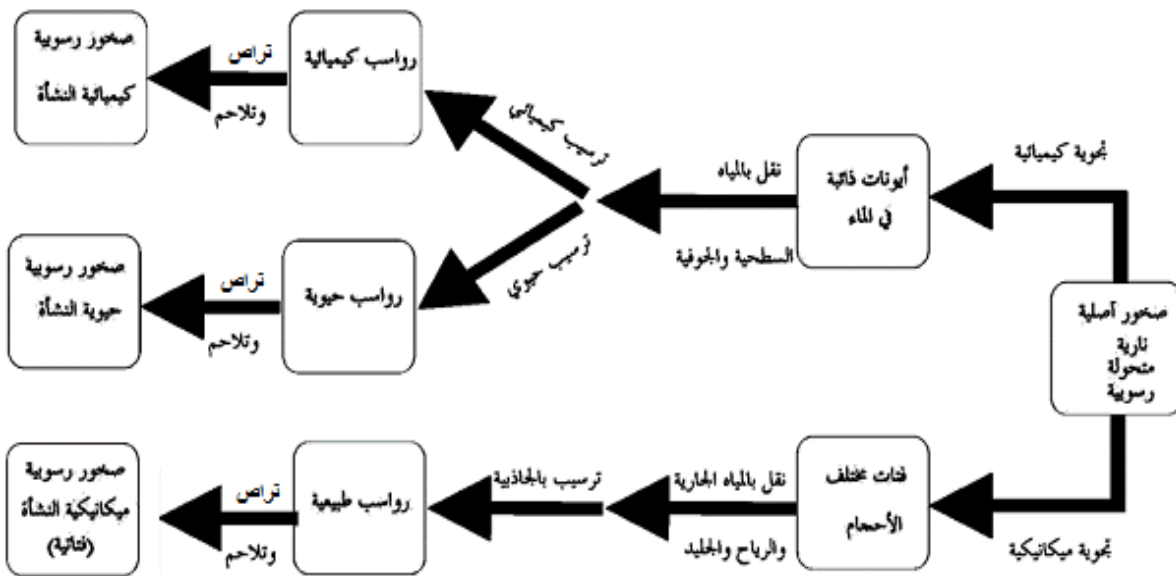
تتكون الصخور الرسوبية إما من بقايا غير عضوية معدنية أو فتات صخور سابقة التكوين (نارية، متحولة، رسوبية)، أو من بقايا عضوية (نباتية أو حيوانية)<sup>(2)</sup>، ويرجع أصل

(1)- إدوار جي تاريسوك، مرجع سابق، ص 239

(2)- محمد صفي الدين، مرجع سابق، ص 58.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

الصخور الرسوبية إلى تلك الرواسب التي أنتجتها عوامل التَّعرية من صخور قديمة ثم حملتها وأرستها في أماكن مختلفة على شكل طبقات، لتتصلب بفعل ميكانيكي نتيجة ضغط الطبقات التي تعلوها و/أو بفعل كيميائي من خلال إنتاج مواد لاحمة تلحم الحبيبات لتتماسك وتتصلب، وتعرف عملية تحوُّل الرواسب إلى صخور صلبة بالتَّصخُّر، والتي تتم عادةً إما عن طريق التَّراص والتَّراكم، أو السَّمنتة<sup>(1)</sup>، فالتَّراص والتَّراكم يحدث نتيجة زيادة الضَّغط على الطبقات الأعمق، فكلما زاد الضَّغط كلما انخفضت نسبة الفراغات بين الجزيئات<sup>(2)</sup>، أما عملية السَّمنتة أو الإلتحام فيتم خلالها بلورة المعادن الموجودة بين حبيبات الرّواسب بشكل تدريجي في فراغ المسام من خلال إنتاج مواد لاحمة تعمل على تلاحم وسمنتة الحبيبات وتخفيض نسبة المسامات، ومن المواد اللاّحمة الشائع وجودها في هذه الصّخور: الكالسيت، والسيليكا، أكسيد الحديد<sup>(3)</sup>، إذ تعد السيليكا وأكاسيد الحديد أكثر المواد اللاّحمة صلابةً، لذا تُنتج صخور رسوبية صلبة أكثر من الكالسيت، ويمكن تلخيص أهم طرق تكوُّن الصّخور الرسوبية في التَّمثيل البياني المبين في الشَّكل رقم 10.



الشكل رقم 10: تمثيل بياني يوضح طرق تكوُّن الصّخور الرسوبية (4)

(1)-إدوار جي تاربيوك، مرجع سابق، ص ص، 229-230.

(2)- محمد صفى الدين، مرجع سابق، ص 66.

(3)-إدوار جي تاربيوك، مرجع سابق، ص 30.

(4)- إبراهيم محمد عبد الله، مرجع سابق، ص 71



## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### I-2-3-1- أنواع الصّخور الرسوبية

لا شك أن الصّخور الرسوبية تشكّلت من رواسب تماسكت وتصلبت في ظروف مختلفة أدت إلى تكوين أنواع متعددة من هذه الصّخور، وللتمييز بينها يمكن تقسيمها إلى أربعة أقسام:

#### أ- الصّخور الرسوبية الحصوية أو الفتاتية (ميكانيكية النشأة)

يتكون هذا النوع من الصّخور من فتات الصّخور والمعادن تساقطت من مصادرها الأصلية بفعل عوامل التّجوية المختلفة، لتتماسك وتتصلب مشكلةً الصّخور الفتاتية<sup>(1)</sup>، وبما أن حجم الحبيبات هو المعيار الرئيسي للتمييز بين الصّخور الفتاتية، لذا يقسمها الجيولوجيين إلى ثلاثة أصناف:

#### - صخور رسوبية ذات حبيبات معدنية مستديرة (الجمودية)

تتكون هذه الصّخور من رسوبيات تحتوي على نسبة عالية من الحبيبات المعدنية تصل إلى (50%)، حيث يكون حجم حبيباتها أكبر من 2 ملم، أما إذا كانت الحبيبات المعدنية مستديرة فإن صخورها تسمى بالجلامية، وإذا كانت الحبيبات تتميز بزوايا محدودة الإطار الخارجي فتسمى عندئذٍ صخورها بالبريشيا breccia<sup>(2)</sup>.

#### - صخور رسوبية رملية جيرية

يرجع أصل هذا النوع من الصّخور إلى رواسب من حبيبات الرمال تصلبت بفعل المواد اللاّحمة التي تمنح لها صلابة ولون معين، ومن أهم المواد اللاّحمة لهذه الصّخور نجد الكالسيوم والسليكا وبعض الأنواع من الأكاسيد الحديدية، فعلى سبيل المثال إذا كانت المادة اللاّحمة الغالبة السليكات أو أكاسيد الحديد يكون الصّخر الناتج شديد الصّلابة والمتانة، أما إذا كانت المادة اللاّحمة الغالبة الكالسيوم فيكون الصّخر الناتج عندئذٍ هشاً ضعيف الصّلابة، وغالباً ما تقسم الصّخور الرملية على أساس المادة اللاّحمة، إما إلى صخور سليكية، أو صخور جيرية، أو صخور حديدية<sup>(3)</sup>.

(1)- محمد صفى الدين، مرجع سابق، ص 58.

(2)- محمد عبد الهادي محمد، مرجع سابق، ص 85.

(3)- محمد صفى الدين، مرجع السابق، ص 67.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### - صخور رسوبية طينية

يرجع أصل هذه الصّخور إلى الرّواسب الدّقيقة النّاعمة التي تترسّب في المناطق الصّحلة بالمياه العذبة، تتميز هذه النّوعية من الرّسوبيات باحتوائها على حبيبات معدنية يقل قطرها عن 0,6 ملم، ومن أهم أنواع هذه الصّخور نجد الحجر الطّيني والطفّل (1).

### ب- الصّخور الرّسوبية الكيمائية

ينشأ هذا النّوع من الرّسوبيات نتيجة ترسّب المعادن المنحلة في المحاليل الكيمائية بواسطة عملية التّبخر والترسّب، والتي تتصلب لاحقاً تحت ظروف وعمليات خاصة لتشكل صخوراً صلبة جيدة التماسك، مثل الحجر الجيري وحجر الصّوان والملح الصّخري وغيرها، أما عملية ترسّب المواد فتتم بطريقتين، الأولى مرتبطة بعمليات غير عضوية كالتبخر والنّشاط الكيمائي الذي ينتج عنه ترسّبات كيمائية، أما الطّريقة الثانية فترتبط بعمليات عضوية خاصة بالكائنات الدّقيقة، التي تعمل على تشكيل ترسّبات كيمائية، لذا فهي تُعد بيوكيمائية المنشأ (2)، ومن أهم أنواع هذه الصّخور نذكر:

### - الصّخور الكربونائية

تتكون هذه الصّخور نتيجة ترسّب كربونات الكالسيوم من المحاليل الكلسية المحتوية على كربونات الكالسيوم الذّائبة، حيث يؤدي هذا الترسّب إلى تحرر غاز  $CO_2$ ، وترسّب كربونات الكالسيوم لتشكل أرجوانيت أقل ثباتاً ليتحوّل في نهاية العملية إلى الكالسييت الأكثر ثباتاً (3)، ومن أهم أنواع هذه الصّخور:

- الصّخور الجيرية: تتكون هذه الصّخور بشكل رئيسي من الكالسييت، وهي تتشكل نتيجة ترسّب كربونات الكالسيوم من المحاليل الجيرية المحتوية على بيكربونات الكالسيوم، وتتميز بتركيب معدني متشابهة، ومسامية عالية (4)، وبدورها هذه الصّخور تصنف إلى مجموعتين:

(1)-محمد عبد الهادي محمد، مرجع سابق، ص 85.

(2)-إدوار جي تاريوك، مرجع سابق، ص 207.

(3)- براك مهدي براك، مرجع سابق، ص 65.

(4)-إدوار جي تاريوك، مرجع سابق، ص 208.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

المجموعة الأولى تضم الصّخور الجيرية الكيميائية التي تترسّب نتيجة عملية تبخر المياه من المحاليل الغنية بكاربونات الكالسيوم، والتي ينتج عنها تكوين صخور الكالسييت، وصخور التّرافرتين، أما المجموعة الثانية فتتمثل في الصّخور الجيرية العضوية التي يرجع أصلها إلى بقايا حيوانية بحرية (1).

- الحجر الجيري البطروخي: يتكون هذا النوع من الحجارة من حبيبات كروية صغيرة جداً ناتجة عن تفاعلات كيميائية تحدث بشكل كبير في مياه البحار، هذه التّفاعلات تؤدي إلى ترسيب كربونات الكالسيوم على شكل طبقات حول نواة دقيقة على هيئة كرات صغيرة متماسكة مع بعضها البعض بواسطة مادة لاحمة، والتي غالباً ما تكون كلسية (2).

- الهوابط والصّواعد: هي تلك الرّواسب التي ترسّبت من جرّاء تساقط قطرات المياه الغنية بالمعادن المنحلة (كربونات الكالسيوم) عبر زمن طويل من سقف الكهوف و/أو المغارات، حيث بعد تبخر تلك المياه تترك وراءها تكوينات صلبة قد تكون ملتصقة بالسّقف بشكل متدلي، يطلق عليها عندئذٍ الهوابط أو النّوازل، أو تكون مترسّبة على أرضية الكهوف لتتشكّل أجسام بارزة تبدو كأعمدة أو كجبال صغيرة تعرف بالصّواعد (3).

### -الصّخور السّيليكية أو السّليسية

تتكون هذه الصّخور من ترسّب معادن السّليكات التي تعد من المعادن الأكثر مقاومة لعوامل التّعرية، فضلاً عن ذلك، فهي مواد لديها قابلية الذّوبان في الماء متدنية، لذا تترسّب وتتصلب، ويطلق على صخورها المتشكّلة بالصّخور السّليكات، ومن أهم أنواع هذه الصّخور الصّوان والشّيرت، وهما يتكونان بصفة رئيسية من سليكات عديمة التّبلور، ويتواجدان على شكل عقد أو طبقات (4).

(1)- محمد صفي الدين، مرجع سابق، ص 69.

(2)- براك مهدي براك، مرجع سابق، ص 65.

(3)- المرجع نفسه، ص 65.

(4)- المرجع نفسه، ص 66.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### - المتبخرات

المتبخرات هي تلك الرواسب التي تنتج من عملية ترسب أملاح مياه البحار بعد تعرضها للتبخر، إذ تترسب المعادن بشكل متسلسل حسب درجة قابليتها للذوبان، بمعنى تترسب أولاً المعادن الأقل قابلية للذوبان، ثم تليها المعادن ذات القابلية الأكبر للذوبان، وهكذا إلى أن تترسب كلياً وتتصلب، فعلى سبيل المثال يترسب الجص بتبخر 80% من المياه، بينما الملح الصخري يترسب بتبخر 90% من المياه<sup>(1)</sup>، ومن أنواع هذه الصخور جبس كبريتات الكالسيوم المائية ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) التي تعد من الصخور الأولية، وهي تتكون من معادن الجبس والأنهدريد، وهي تشبه الجبس في تركيبه الكيميائي لكنها أكثر صلابة منه<sup>(2)</sup>.

### ج- الصخور الرسوبية عضوية النشأة

يتكون هذا النوع من الصخور نتيجة نشاط الكائنات الدقيقة في المياه المالحة<sup>(3)</sup>، وهي ترتبط بالعمليات العضوية لهذه الكائنات التي تعمل على تشكيل ترسبات كيميائية، لذا فهي بيوكيميائية المنشأ، كما قد تنشأ عبر تجمع لبقايا كائنات حية مثل الحجر الجيري العضوي الذي يتكون من هياكل حيوانات غنية بكاربونات الكالسيوم، كما يتم الترسيب العضوي أيضاً بواسطة الكائنات الدقيقة كالبكتيريا التي تنتج عن تحلل النباتات، إذ تعمل على ترسيب الأكاسيد من مياه البحيرات والمستنقعات<sup>(4)</sup>.

ومن أنواع هذه الصخور نذكر:

- الحجر الجيري العضوي: هذا النوع من الحجارة يتكون بفعل نشاط الكائنات الحية وتراكم البقايا العضوية كالعظام والفواقع.

- الحجر الجيري المرجاني: ينتج عن تراكم هياكل المرجان.

- حجر الطباشير: هو صخر لين ناصع البياض ناعم، مسامي متدني الصلابة، يتكون تقريباً من أجزاء صلبة من الكائنات المجهرية البحرية<sup>(5)</sup>.

(1)- إدوار جي تاريوك، مرجع سابق، ص 211 .

(2)- براك مهدي بـراك، مرجع سابق، ص 66.

(3)- محمد عبد الهادي محمد، المرجع السابق، ص 84.

(4)- إدوار جي تاريوك، مرجع سابق، ص 209.

(5)- المرجع نفسه، ص 209.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

- حجر الكوكينا: هو صخر حبيباته خشنة، يتألف من أصداف رديئة السمّنة وشظايا من الصدف التي تجمعت بواسطة المواد اللاّحمة.

- حجر الفحم: هو صخر رسوبي عضوي، يتشكّل عبر مراحل، يبدأ بتراكم بقايا النباتات الميتة، لتتحل جزئياً فيتشكّل اليخت، الذي يتحول بعد ذلك إلى ليجنيت، ثم يتحوّل لاحقاً بفعل الدفن وزيادة كل من الضّغط ودرجة الحرارة ونسبة الكربون إلى صخر أسود أكثر صلابةً، يسمى بالفحم البيتيوميني، وفي الأخير يتحول هذا الفحم البيتيوميني إلى صخر الأنتراسيت، الذي هو صخر أسود متحول شديد الصّلابة (1).

### I-2-3-2 - مميزات الصّخور الرّسوبية

يمكن اجمال أهم مميزات الصّخور الرّسوبية فيما يلي (2):

- تكون على شكل طبقات مختلفة التراكيب واللون والسّمك؛
- تتميز بوجود سطوح الانفصال التي تتغيّر عندها طبيعة التّكوينات الرّسوبية؛
- تتميز بوجود الكثير من الشقوق والعروق التي تعد مستويات انفصال؛
- تحتوي على حفريات (بقايا حيوانات مائية) خاصة التي تتكون في البحار أو المحيطات؛
- تحتوي على مسامات و/أو فجوات، لذا تعد حجارة مسامية منفذة للسوائل.

### I-3-3 - أهم خواص الحجارة

لا شك أن الصّخور على اختلاف أنواعها تمتلك جملة من الخواص الفيزيائية والميكانيكية تميزها عن بعضها البعض، وهي ترتبط بطبيعة تكوينها المعدني أو الفلزي، إلى جانب نوعية موادها اللاّحمة، فضلاً عن طريقة تكوينها، التي تتحكم في درجة تجانس هذه الخواص وكفاءتها، وفي درجة مقاومتها للتلف، لذا فمعرفة هذه الخواص تُعد من العمليات الصّورية في صيانة وترميم الآثار، ويمكن إجمال أهم خواص الحجارة فيما يلي:

### I-3-3-1 - التّركيب المعدني

تلعب التّركيبة المعدنية الأساسية للحجارة، وكذا المعادن الإضافية والمواد الرّابطة بالإضافة للتّركيب البلوري لتلك المعادن دوراً بالغ الأهمية في تجانس البنية الدّاخلية

(1) - المرجع نفسه، ص212.

(2) - عزت حامد قادوس، مرجع سابق، ص171.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

للحجارة، فضلاً عن جودة خواصها الفيزيوميكانية، ومن هنا يتضح دور هذه الخاصية سواء في عملية التآلف أو العلاج (1).

### I-3-2- النسيج

يُعبّر نسيج الصّخور على اختلاف أنواعه عن حجم وشكل الحبيبات المعدنية المكونة للصّخور، ودرجة تماسكها وطريقة ترتيبها، إلى جانب خواصها الفيزيائية والميكانيكية، فالصّخور الرسوبية تحتوي على حبيبات معدنية مختلفة الحجم والشكل، يتراوح شكلها بين المستديرة وشبه المستديرة وذات الزوايا، كما ترتبط هذه الحبيبات مع بعضها البعض بواسطة مواد رابطة والتي على أساسها يصنف الصّخر صلباً أو هشاً، فعلى سبيل المثال الصّخور التي تحتوي على كربونات الكالسيوم وعلى الطّفلة، تكون أكثر هشاشة، في حين التي تتلاحم حبيباتها بأكاسيد الحديد والسليكات تكون أكثر صلابة (2).

### I-3-3- الكثافة والثقل النوعي

يستخدم هذان المصطلحان للتعبير عن خاصية واحدة، وهناك من يفرق بينهما، فالثقل النوعي يعبر عن ثقل مادة ذات حجم معين من الماء، أو النسبة بين كثافة المادة وكثافة الماء، أما الكثافة فتعبر عن وحدة كتلة المادة على وحدة كتلة الحجم وهي تقدر بـ (غ/سم<sup>3</sup>)، والحجارة كباقي المواد تمتلك كثافة معينة وهي ترتبط بشكل أساسي حسب طبيعة تركيبها الكيميائي والبلوري، وهي تتغير باختلاف درجة الحرارة والضغط، اللذان يسببان تمدد وانكماش الوحدة البنائية التي تتكون منها الحجارة (3).

ومما لا شك فيه أن الكثافة تعد أحد أهم خواص الحجارة وأبرز المعايير التي من خلالها يمكن تقدير درجة صلابة الحجارة الأثرية، فحسب إبراهيم محمد عبد الله (4) الحجارة التي تملك كثافة بين 2,8 و3,5 غ/سم<sup>3</sup> يمكن اعتبارها حجارة الصّلبة، أما إذا كانت كثافتها أقل من 2,5 غ/سم<sup>3</sup> فتعتبر عندئذٍ الحجارة هشّة ضعيفة التماسك.

(1)- محمد عبد الهادي محمد، مرجع سابق، ص 87.

(2)- المرجع نفسه، ص 86.

(3)- المرجع نفسه، ص 87.

(4)- إبراهيم محمد عبد الله، ترميم الآثار الحجرية، دار المعرفة الجامعية للطبع والنشر والتوزيع، مصر، 2012، ص 77

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### I-3-4- النفاذية والخاصية الشعيرية

الخاصية الشعيرية هي ظاهرة انتقال الماء داخل الشبكة المسامية بفعل اختلاف الضّغط بين السائل والهواء، حيث تكون حركة السائل حسب اتجاه الضّغط، وعندما تكون عكس اتجاه الجاذبية تسمى هذه الظاهرة عندئذٍ بالإرتفاع أو الصّعود الشعيري<sup>(1)</sup>، وتعتمد الخاصية الشعيرية أو نفاذية الحجارة للمحاليل على مسامية الحجارة وحجم حبيباتها والسّطح النوعي لهذه الحبيبات، إلى جانب الشدّ السطحي للسائل ودرجة لزوجه<sup>(2)</sup>، وهي تعد من الخواص الهامة التي يجب معرفتها وتقديرها قبل إجراء أي عمليات لعلاج الحجارة.

### I-3-5- المسامية

تعبر المسامية عن النسبة المئوية لحجم الفراغات الموجودة بين حبيبات المادة بالنسبة للحجم الكلي لهذه المادة، هذه الخاصية تتباين في الأنواع المختلفة للصخور، إذ تقل في الصّخور النارية والمتحولة، بينما ترتفع في الصّخور الرسوبية نتيجة وجود عدد كبيرة من الفراغات كون الحبيبات المكونة لها تظل مستقلة بأشكالها الشبه الكروية والغير المنتظمة<sup>(3)</sup>. ولقد بينت العديد من الدراسات أنّ المسامية عامل أساسي في تقدير مقاومة الحجارة للتدهور، حيث تتناقص جودة الخواص الفيزيائية والميكانيكية للحجارة بازدياد مساميتها<sup>(4)</sup>.

### I-3-6- الصلابة

تتباين الحجارة في درجة صلابة المعادن المتكونة منها وطبيعة مادتها الرابطة، لذا فمعرفة صلابة المعادن يساعد على التّعرف على الخواص الميكانيكية للحجارة، ويفيد في اختيار أفضل المواد وأنجع أساليب العلاج التي تتناسب وصلابة الحجارة، أما صلابة المادة فتتمثل قدرتها في مقاومة الخدش أو الثني أو الكسر أو تغلغل الأجسام الأخرى فيها، في حين اختبار الصلابة يُعد أحد أبرز الاختبارات غير الإتلافية، له أهمية كبيرة في مجال الصيانة والتّرميم، ويتم بفحص قدرة مادة صلبة على خدش مادة أقل

(1)-Domasloswski Wieslaw , conservation préventive de la pierre, traduit par woszyck (i), unesco, paris 1982, p 110.

(2)-محمد عبد الهادي محمد، مرجع سابق، ص 88.

(3)- المرجع نفسه، ص ص 87-88.

(4)- ضياء غاوي صالح، (صلاحية صخور الحجر الجيري من تكوين الفتحة لأغراض البناء وركام الطّرق في محافظة نينوى، شمال العراق)، مجلة جامعة الأنبار للعلوم الصّرفية، المجلد 6، العدد 3، 2012، ص ص 147-148.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

صلابةً منها، وحسب مقياس موهس للصلابة\*، الذي وضع ترتيباً لأكثر من عشرة (10) مواد بشكل تصاعدي حسب درجة صلابتها، أما حالياً فتوجد العديد من الأجهزة للقياس الدقيق للصلابة وفي مساحات صغيرة جداً وفي الإتجاهات المختلفة<sup>(1)</sup>.

### I-3-7- المواد الرابطة

تلعب المواد الرابطة دوراً بالغ الأهمية في تحديد صلابة الحجارة ومقاومتها، وهي تميز الحجارة الرسوبية فقط دون غيرها، فالحجارة التي تحتوي على مواد رابطة ضعيفة الصلابة ككربونات الكالسيوم أو المعادن الطينية تكون أقل صلابة وأكثر هشاشة مثل حجارة التوف الكهفي أو الحجارة الرملية، أما التي تحتوي على مواد رابطة ذات صلابة جيدة مثل معادن السليكا أو أكاسيد الحديد تكون أكثر صلابة ومتانة<sup>(2)</sup>، لذا فمعرفة طبيعة المواد الرابطة يعد عملية هامة في تقدير درجة صلابة الحجارة، ومقدار تحملها لعوامل التلف، إلى جانب مساهمتها في اختيار أسلوب العلاج المناسب.

### I-3-8- مقاومة التحمل الميكانيكي

تُعرف خاصية مقاومة التحمل الميكانيكي بمقدرة المادة على مقاومة الأحمال والضغوط الواقعة أو المطبقة عليها قبل أن تستسلم هذه المادة للتشقق والتصدع، وهي تقدر بـكلغ/سم<sup>2</sup>، أما بالنسبة للصخور فقدرتها تحملها للضغوط والأحمال تتفاوت من صخر لآخر، إذ تمتلك الصخور النارية وبعض الصخور المتحولة التي لا يظهر فيها التركيب الصفائحي قوة تحمل جيدة، عكس الصخور الرسوبية التي تكون ضعيفة المقاومة<sup>(3)</sup>.

### I-3-9- التركيب الطبقي للحجارة

يُعد التركيب الطبقي من الصفات المميزة للصخور الرسوبية وبعض الصخور المتحولة، إذ يُعبر سمك التركيب الطبقي عن طبيعة الوسط الحامل والفترة الزمنية، ونوعية المواد اللاحمة وطريقة التشكل، في حين هذا التركيب الطبقي يكون على شكل مستويات

\*- وضع هذا المقياس عام 1812م على يد عالم المعادن الألماني فريدريك موهس، ويعتبر مقياس موهس مقياساً ترتيبياً، أي أنه يعطي المواد ترتيباً معيناً في قائمة المواد ولا يعطي القيمة المطلقة للصلابة.

(1)- محمد عبد الهادي محمد، مرجع سابق، ص 88.

(2)- المرجع نفسه، ص 89.

(3)- المرجع نفسه، ص 89.



## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

أفقية متتالية مختلفة السمك والترابط والتماسك، بمعنى يكون الترابط بين حبيبات كل طبقة أشد وأقوى من الترابط مع حبيبات الطبقة التي تعلوها أو التي أسفلها، وذلك لوجود فواصل زمنية بينها، حيث تكون قد تغيرت فيها معدلات الترسيب والخواص الطبيعية والكيميائية للمكونات المعدنية مثل اللون والحجم ونسب المواد المعدنية ونوعية المواد الزابطة والتركييب الكيميائي لتلك المواد المعدنية<sup>(1)</sup>، وهذا يترتب عنه عدم تجانس التركييب المعدني، فضلاً عن ضعف الخواص الفيزيائية والميكانيكية للحجارة، مما يؤدي إلى تباين في مقاومة أجزاء الحجارة لعوامل التآلف في مختلف الإتجاهات، سواء الأفقية، أو العمودية، أو الجانبية<sup>(2)</sup>.

وبصفة عامة يمكن القول بأنّ التركييب الطبقي للحجارة يعد شكلاً من أشكال عدم الإستمرارية، وهو بمثابة نقاط ضعف تستغلها عوامل التآلف المختلفة، ناهيك عن عدم احترام اتجاه هذه الطبقات عند استخدامها في البناء، الأمر الذي يحفز ويسرع من آليات التآلف الفيزيوميكانيكية والكيميائية، سواء بفعل الأحمال و/أو الضغوط الواقعة عليها، و/أو بفعل صعود المحاليل بالخاصية الشعيرية، أو تأثير العوامل المناخية.

### I-3-10- التمدد الحراري لمعادن للحجارة

تعتبر هذه الخاصية من الخواص المميزة للحجارة، وهي تختلف حسب طبيعة المعادن المكونة للحجارة ونقلها أو توصيلها للحرارة، فضلاً عن تأثير درجات الحرارة، ويتضح ذلك في تأثير الفارق الكبير بين درجات حرارة الليل والنهار التي تصل إلى معدلات كبيرة على سطح الحجارة، حيث ترتفع درجة حرارتها نهاراً، مما تتسبب في تمدد المعادن المكونة لطبقتها الخارجية بينما الداخلية تبقى درجة حرارتها منخفضة، أما ليلاً فيحدث العكس، حيث تنخفض درجات الحرارة، وعندها تنقلص وتتكم معادن السطح الخارجي، بينما معادن الأجزاء الداخلية تكون لا تزال في حالة تمدد، وهذا الإختلاف في معدلات التمدد والإتكماش يعد السبب الرئيسي وراء تفتت وتشقق الحجارة وتساقط حبيباتها المعدنية<sup>(3)</sup>.

### I-3-11- التوصيل الحراري

تعد خاصية التوصيل الحراري للحجارة مسؤولة بدرجة كبيرة عن مختلف التشققات

(1)- المرجع نفسه، ص 90.

(2)- عبد المعز شاهين، مرجع سابق، ص 170.

(3)- محمد عبد الهادي محمد، مرجع سابق، ص 90.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

التي تحدث لها، إذ تختلف درجة توصيلها أو نقلها للحرارة حسب نوع الحجارة، قد تكون جيدة التوصيل أو عاجزة التوصيل الحراري (1)، فالحجارة المعرضة بشكل مباشر لأشعة الشمس تُخزن طبقتها السطحية طاقة حرارية كبيرة، وعند تشبعها يتسرب جزء منها إلى طبقاتها الداخلية عبر المسامات والشقوق، وعندما ينقطع المصدر الحراري يبدأ السطح الخارجي في فقدان حرارته تدريجياً نتيجة احتكاكه بالهواء البارد إلى غاية الوصول إلى أدنى درجة حرارة ليلاً، فيكون عندها السطح الخارجي أبرد من السطح الداخلي.

ونظراً لإختلاف المعادن المشكلة للحجارة تتمدد وتتقلص هذه المعادن بمعدلات معينة وفي اتجاهات مختلفة، مما يجهد هذه الحجارة وينهك مقاومتها، وينتج عنه تشققات بدرجات متفاوتة، وقد تتسع هذه التشققات بتكرار هذه العملية أو بفعل عوامل أخرى كالجليد.

### II - مواد البناء الحجرية للموقع الأثري

يُعد الإلمام بمواد وتقنيات البناء المستخدمة في تشييد معالم الموقع الأثري لجميلة من المواضيع الهامة، لما توفره من معلومات تساهم في فهم وإدراك آليات تدهور هذه المعالم، ومن جهة أخرى اختيار أنجع المواد وأفضل الأساليب للعلاج والوقاية، ومن خلال تشخيص مختلف هياكل مباني الموقع الأثري، تبين أنها أنجزت من مواد متنوعة، من حجارة وآجر وملاط وغيرها من المواد، هذا التنوع ساهم في تعدد تقنيات البناء، ونظراً لطبيعة دراستنا، سنركز على الحجارة الكلسية، كونها مادة البناء الرئيسية التي استخدمت بشكل كبير لأغراض متعددة في إقامة وتزيين الجدران والأرضيات، وللتميز بينها قسمناها إلى حجارة البناء، وحجارة التزيين:

#### II-1- حجارة البناء

وفق الدراسة التي أقيمت في إطار مشروع MEDISTONE (2)، والتي بينت وجود تسعة (9) أنواع من الحجارة، كلها كلسية استخدمت بشكل متفاوت، أربعة (4) منها مستخدمة بصفة رئيسية، وخمسة (5) بصفة ثانوية كما هو مبين في الجدول رقم 8، إلا أنه سيتم التطرق للأنواع المستخدمة بصفة أساسية كعناصر معمارية أو كتل حجرية ودبش.

(1)- المرجع نفسه، ص 90.

(2)- Dessandier David 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, p70.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

الرقم	نوع الحجارة	الإستخدام
1	الحجارة الجيرية أو الكلسية الصلبة ذات الحبيبات الناعمة واللون الرمادي	رئيسي
2	الحجارة الجيرية البيوكلاست الرمادية ذات الحبيبات الناعمة	متوسط
3	التف أو التوف أو الطف البركاني الكهفي ذو اللون البيج	متوسط
4	الحجارة الكلسية ذات اللون الرمادي-البيج الفاتح (تدرج بين الرمادي الفاتح والبنّي)	متوسط
5	الترافرتين ذات شكل دودي vermiculé ولون مائل للإحمرار	ضعيف
6	الحجارة الكلسية القوقعية البيج	ضعيف
7	حجارة الدولوميت ذات اللونين الرمادي والأحمر الطيني	ضعيف
8	حجارة الترافونتين ذات الليثيوكلاست الكبير المحاط بالزادبولتيك المتحجر	ضعيف
9	حجارة البريشيا الجبسية ذات اللون الوردى الأرجواني	ضعيف

الجدول رقم 8: يبيّن أهم أنواع الحجارة الكلسية المستخدمة في الموقع الأثري (1)

### II-1-1: الحجارة الكلسية الصلبة

تُعد الحجارة الكلسية الصلبة ذات اللون الرمادي والحبيبات الناعمة من الصخور الرسوبية، وقد استخدمت على هياكل مختلفة، ككتل كبيرة الحجم مصقولة (Pierre de taille) وغير مصقولة، وأيضاً على هيئة دبش (Moellons)، وأحياناً على شكل عناصر معمارية (أعمدة، تيجان، كورنيشات، بلاطات أرضية)، ويمكن ملاحظة هذا النوع من الحجارة بشكل جلي في كل من بازليك جوليا، ومنزل أوربا، وعلى جانبي الكارودا الكبير في شكل أعمدة، كما يظهر في الصورة (رقم 1).

تتكون هذه النوعية من الحجارة أساساً من الكالسييت بنسب تتراوح من 60 إلى 90 %، ومن الكوارتز بنسب بين 10 إلى 30 %، بالإضافة إلى الفلدسبات، والكلوريت، والموسكوفيت والبيريت، وتعتبر حجارة جُد صلبة متماسكة لديها مقاومة جيدة للضغط تتراوح بين 51 إلى 317 MPa، ومسامية منخفضة أقل من 1 %، كما تتميز بمظهر ناعم ولون رمادي قاتم مع باتينة ذات لون المُعرة الرمادي، فضلاً عن ذلك، فهي تحتوي على بقايا للكائنات

(1)-Ibid,p70.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

الحية من أصداف وقواقع بحرية<sup>(1)</sup>، بالإضافة إلى شبكة من العروق (veines) المليمترية المملوءة ببلورات الكالسيت الأبيض، وأحياناً بأكسيد الحديد الذي يمنحها اللون البني.



**الصورة رقم 1:** تبيين الجدار الغربي للفوروم القديمة منجز بكتل حجرية مصقولة من نوع الحجارة الكلسية ذات الحبيبات الدقيقة بتقنية النّظام الكبير.

### II-1-2- حجارة البيوكلاست

تُعتبر الحجارة الجيرية البيوكلاست الرّمادية ذات الحبيبات النّاعمة من الصّخور الرّسوبية الكلسية، استخدمت في الموقع الأثري بكثافة أقل من النّوع الأول، استعملت بشكل كبير في الحي القديم في كل من السّاحة السّيفيرية، ومعبد العائلة السّيفيرية، والكابيتول، وسوق الإخوة كوزينيوس وغيرها من المباني، توجد على هيئة ديش وكتل حجرية مصقولة، إلى جانب عناصر معمارية، فعلى سبيل المثال استخدمت ككورنيشات في المعبد السّيفيري كما يظهر في (الصّورة رقم 2).

تُعد هذه الحجارة الكربونية نقيّة، تتكون من أكثر من 90% من الكالسيت مع نسب قليلة من الكوارتز لا تتعدى 10%، ونسب متدنية من المعادن التّكميلية، كالهيماتيت والقوتيت والكلوريت، فبالرغم من احتوائها على عروق إلا أنّها تعتبر

(1)- Ibid , pp71-81.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

من الحجارة الصلبة، إذ تمتلك مقاومة للضغط تتراوح بين 38 إلى 50 MPa، في حين مساميتها ضعيفة جداً لا تتعدى نسبتها 2% (1)، كما تتميز بلون رمادي وباتينة رمادية أيضاً لكنها قاتمة، بالإضافة إلى احتوائها على عروق مملوءة بالكالسيت الأبيض.



الصورة رقم 2: كورنيشات منحوتة من الحجارة الجيرية البيوكلاست ذات اللون الرمادي والحبيبات الناعمة تقع على جانبي معبد العائلة السيفرية

### II-1-3- حجارة التوف أو الطّف الكهفي

تتكون حجارة التوف الكهفي أو الحرماي ذات اللون البيج الفاتح (بني الرمادي أو المصفر)، نتيجة التفاعلات الكيميائية والترسب من المحاليل المائية بالتبخّر، تكون غالباً إسفنجية الشكل تملؤها الثقوب والتجاويف، وهذا ما جعلتها تمتلك مسامية مرتفعة جداً مقارنةً بالأنواع الأخرى من الحجارة، فضلاً عن ذلك، فهي تعتبر حجارة نقية حيث تتألف من الكالسيت  $\text{CaCO}_3$  بنسب مرتفعة تصل إلى 95%، مع نسب متدنية من الكوارتز  $\text{SiO}_2$ ، كما تتميز بلون بني مع باتينة رمادية فاتحة اللون (2).

(1)- Dessandier David et All, Ibid ,p.88.

(2)-Ibid ,p 94 .



## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

نظراً لإمتلاكها مسامية عالية فُضِلَ استعمالها في إقامة جدران القاعات المائية للحمامات، ولخفة وزنها استخدمت كمادة للحشو في التسقيف في كل من الأقواس والأقبية لتخفيف الأحمال على هيكل البناء.

لقد استخدمت بشكل كبير في حمامات جميلة على هيئة ديش كما يظهر في (الصورة رقم 3)، واستخدمت أيضاً كدبش في إقامة الجدران والأقواس في كل من المعبد السيفيري والكابيتول، وفي المعمودية بالحي المسيحي كما يظهر في الصورة (رقم 4).



الصورة رقم 3: حجارة التوف الكهفي المستخدمة كدبش في جدران الحمامات الكبرى



الصورة رقم 4: حجارة التوف الكهفي المستخدمة كدبش في قوس المدخل الشرقي للمعمودية

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### II-1-4-الحجارة الكلسية ذات اللون البيج الفاتح

تُعد الحجارة الكلسية ذات اللون البيج الفاتح أيضاً من الأنواع الرئيسية التي استخدمت في تشييد معالم هذا الموقع الأثري، لكن بشكل محدود، إذ يمكن تمييزها في المدينة القديمة في كل من الفوروم القديمة، والبازيليك، ومنزل أوربا، كما استعملت أيضاً في الحي المسيحي على شكل عناصر معمارية من أعمدة وتيجان كما يظهر في الصورة (رقم 5)، وقد استعملت كأكتاف للأبواب والنوافذ، وأحياناً كمنحوتات مثل الأنصاب التذكارية.

من أبرز ما تتميز به هذه النوعية من الحجارة الصلابة الجيدة، وهي تتكون من شظايا صغيرة من الروديست مع بلورات السباريتيك، كما تحتوي على بقايا للكائنات الحية من أعشاب وطحالب بحرية (1)، لديها لون بيج فاتح، وباتينة رمادية، كما أنها لا تخلو من العروق التي تأخذ اللون الأحمر.



الصورة رقم 5: الحجارة الكلسية ذات اللون الرمادي البيج الفاتح موجودة

على شكل أعمدة في بازيليك كروسكنيوس (الحي المسيحي)

(1)- Dessandier . D et All , Ibid ,p95.



## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### II-1-5 - حجارة الترافونتين

استخدمت حجارة الترافونتين في أعمال البناء الخارجية والداخلية، ويظهر ذلك جلياً في بازيليك كروسكنيوس بالحي المسيحي، حيث تتواجد على شكل أعمدة كما هو مبين في (الصورة رقم 6).

تعتبر حجارة الترافونتين من الحجارة الجيرية، تمتاز بلون المَعْرَة المائل إلى الإحْمَرَارُ، أما طبقتها السطحية فرفيقة جداً وذات لون رمادي، ينتج هذا النوع من الحجارة من ترسيب كربونات الكالسيوم من المياه الباطنية حول الينابيع الحارة، وهي تتكون تقريباً من 98% من الكالسييت مع نسب قليلة من الكوارتز، لذا تعد حجارة كربونية نقية، فضلاً عن ذلك، فهي تملك بنية هيكلية ذات شكل دودي Vermiculé، كما تحتوي على فراغات وتجاويف كثيرة وبأحجام مختلفة قد يصل قطرها أحياناً إلى 5 سم، وهذا ما جعلها تملك مسامية كبيرة مع صلابة محدودة جداً، لذا فهي حجارة نصف صلبة (1).



الصورة رقم 6: تبين أعمدة من حجارة الترافونتين ذات اللون المَعْرَة المَحْمَرُ على مستوى بازيليك كروسكنيوس بالحي المسيحي



## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### II-2- الحجارة التزيينية

يقصد بالحجارة التزيينية تلك الحجارة الطبيعية التي تستخدم بغرض تكسية أو تغليف أو تغطية المساحات المكشوفة للعناصر الإنشائية للمبنى (الهيكل، الجدران والأرضيات)، أو بمعنى آخر، هو الإكساء الحجري بشرائح أو صفائح من الحجارة وفق سمك وأبعاد معينة، يتم تثبيتها بواسطة مواد قد تكون ملاط أو أية مادة لاصقة، بحيث تمنح للمبنى المظهر النهائي، فضلاً عن ذلك، فهي تعبر بطريقة أو بأخرى عن مكانة ووظيفة وأسلوب إنشاء المبنى (1).

ولقد تنوعت الحجارة المستخدمة في تزيين مباني كويكول، وبالنظر إلى معالم الموقع الأثري نجد أنّ الحجارة والرّخام ومنتجاتهما أهم المواد التي استخدمت في تزيين الجدران فضلاً عن الأرضيات، ومن أهم الحجارة التي استخدمت بغرض التزيين نجد:

### II-2-1- الرّخام

يُعتبر الرّخام حجراً طبيعياً ناتج عن تحوّل الأحجار الكلسية أو الدولوميتية، يوجد بألوان متعددة نتيجة وجود الشوائب والأكاسيد، يُعد من أهم مواد التزيين في كويكول، حيث يوجد على هيئة أعمدة، فضلاً عن استخدامه على شكل صفائح وبلاطات في تغطية الجدران والأرضيات، وتماثيل منحوتة، وهو متوزع بصفة كبيرة في سبعة مباني رئيسية: معبد جننيتركس، بيت الأسقف والكاهن، مجلس العشير، الكابيتول، وسوق كونسينوس، منزل باخوس، الحمامات الكبرى (2)، وغيرها من المعالم، ويمكن القول بشكل عام، بأنّه توجد ثلاثة أنواع من الرّخام استخدمت بشكل كبير في الموقع، وهي بدورها تتضمن أنواعاً فرعية:

- الرّخام الكلاسيكي الملون؛

- الرّخام الأبيض الرّمادي النقي؛

- الرّخام الأبيض البلوري ذو الخطوط الرّمادية.

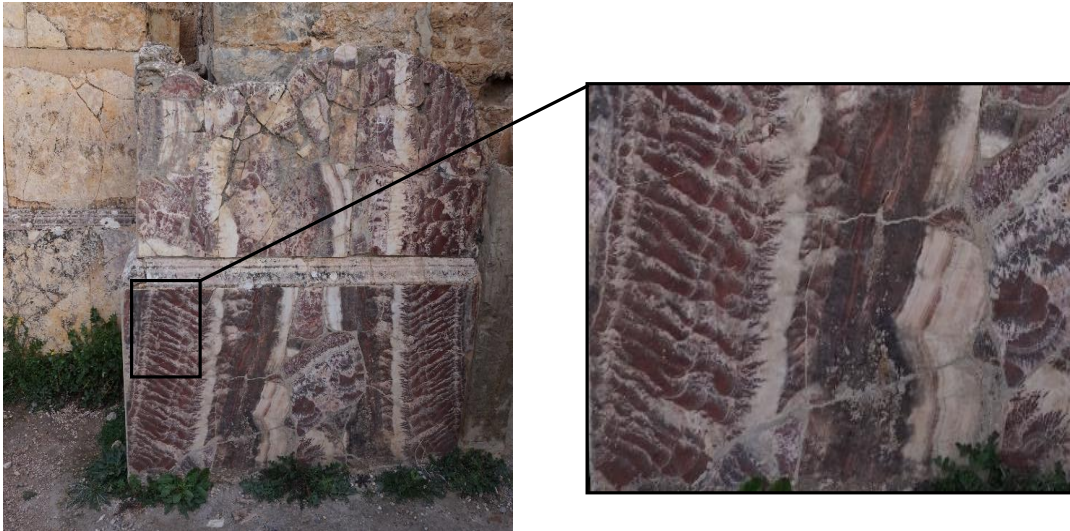
1- فؤاد خضرة، رنا غره، (دأرة في استخدامات الإكساء الحجري وملائمته لأبنية مدينة اللاذقية ومناخه)، مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية، سلسلة العلوم الهندسية المجلد 36، العدد (04)، سوريا، 2014، ص 59.

(2)- Dessandier David et all ,Op.cit ,p 25.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### II-1-1-2- الرخام الكلاسيكي الملون

- استخدم هذا النوع من الرخام بشكل كبير في حوض البحر المتوسط في العهد الروماني، أما في الموقع الأثري لجميلة فيلاحظ وجود سبعة أنواع منه (1):
- أربعة أنواع جلبت من اليونان وهي:  
-السيبولين الأخضر (marmor carystium) ver Cipolin المرمر الكاريسيوم)  
الكاريستوس، جلب من جزيرة ليوبي؛  
- الأخضر العتيق (marmor theassalicum) ver antique المرمر ثيساليكوم)، جلب من لاريسا؛  
-البريشيا سيتيباسي (marmor scyreticum) المرمر سكريتيكيوم جلب من جزيرة سكيورس؛  
- البورفيدو (السماق) الأخضر العتيق profido verdantico جلب من ستيفانيا.  
• نوعان جلبا من شمال إفريقيا وهما:  
- الألباستر بيرسيلا (albastro percella، جلب من بوحنفية معسكر (الصورة رقم 7)؛  
- الجيالو القديم (marmor numidicum) gialloantico)، جلب من شمتو (تونس).  
• نوع واحد جلب من آسيا الصغرى وهو غرانيت ألميسيان أو المرمر ألميسيوم، جلب من كوزاك وبارغام بتركيا، استخدم كأعمدة في معبد جنيتريكس.



الصورة رقم 7: صفائح الرخام من نوع الألباستر بيرسيلا مستخدمة

في تزيين جدران إحدى قاعات الحمامات الكبرى

(1)- Ibid ,p 28.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### II-2-1-2 الرّخام الأبيض الرّمادي النقي

استخدم هذا النوع من الرّخام في جميلة بشكل كبير في إنجاز العناصر المعمارية من أعمدة وتيجان، إلى جانب التّمائيل، وهو بدوره يتضمن نوعين (1):

#### أ- رخام أبيض ذو حبيبات دقيقة

يعد هذا الرّخام الأبيض ذو الحبيبات الدّقيقة رخاماً نقياً، يتميز باحتوائه على حبيبات متوسطة الحجم أقل من 1 ملم، كما يتميز بنسيج فسيفسائي، وأحياناً بتخطيط ضعيف مع وجود بعض النّقاط أو البقع، جلب من شمال شرق سكيكدة من منطقة تعرف بفليفلة، وقد استخدم لأغراض متعددة في تكسية الجدران، وإقامة الأتصاب والتّمائيل، من أبرز ما أنجز به من هذا الرّخام، تمثال جوبيتار الضّمخ المحفوظ حالياً بمتحف الموقع الأثري لجميلة.

#### ب- رخام أبيض ذو حبيبات متوسطة

يُعد هذا النوع من الرّخام نقياً، يتكون من معدن السليكا، استخدم كذلك في إنجاز بعض التّمائيل والتّيجان، يتميز بتكوين معقد نوعاً ما مَنَحَهُ ألواناً متعددة بين الأخضر والأزرق الفاتح، وألوان أكثر حرارة كالأصفر الرّيتي.

### II-3-1-2 الرّخام الأبيض البلوري ذو الخطوط الرّمادية

يتميز هذا الصّنف من الرّخام بلون أبيض مع خطوط رمادية وأحياناً بقعاً، ذو حبيبات متوسطة النّعومة منحت له مظهراً يطلق عليه (gréco scritto)، كان يجلب من عناية (2).

ينتشر هذا الرّخام في مختلف أرجاء الموقع الأثري، وهو يتواجد على شكل بلاطات وأعمدة على مستوى قاعات الحمامات الكبرى كما يظهر في (الصور رقم 8)، وأيضاً في معبد فينوس (الصور رقم 9)، وقد تم العثور أثناء التّقيب على قطع مكسورة على شكل صفائح جمعت وهي محفوظة بمتحف الموقع الأثري.

(1)- Dessandier . D et All , Ibid , pp 53 -55.

(2)- Ibid, p56.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء



الصورة رقم 9: أعمدة رخامية من نوع gréco scritto بمعبد فينوس



الصورة رقم 8: أعمدة رخامية من نوع gréco scritto بقاعة بالحمامات الكبرى

### II-2-2- أبحار متنوعة

إلى جانب أنواع الرخام الكلاسيكي التي ذكرناها، وجدت أربعة أنواع أخرى من الرخام الملون مستعملة في هذا الموقع الأثري تتمثل فيما يلي (1):

#### أ- الحجر الكلسي الأسود من نوع نيرو القديم (Nero Antico)

يطلق هذا الإسم على الحجارة السوداء، وهو يقتصر على عدد محدود من الكلس الكربوني الأسود ذو الحبيبات الدقيقة، وقد استخدم على شكل أعمدة صغيرة عند بداية الكاردوا الكبير، ويعتقد أنه جلب من تونس.

#### ب- حجر جيري ذو لون أصفر وردي باهت من نوع الجيالو القديم

يشبه إلى حد كبير الجيالو العتيق (مرمر التوميدسيوم)، جلب من شمال شرق الكرستال الجزائر.

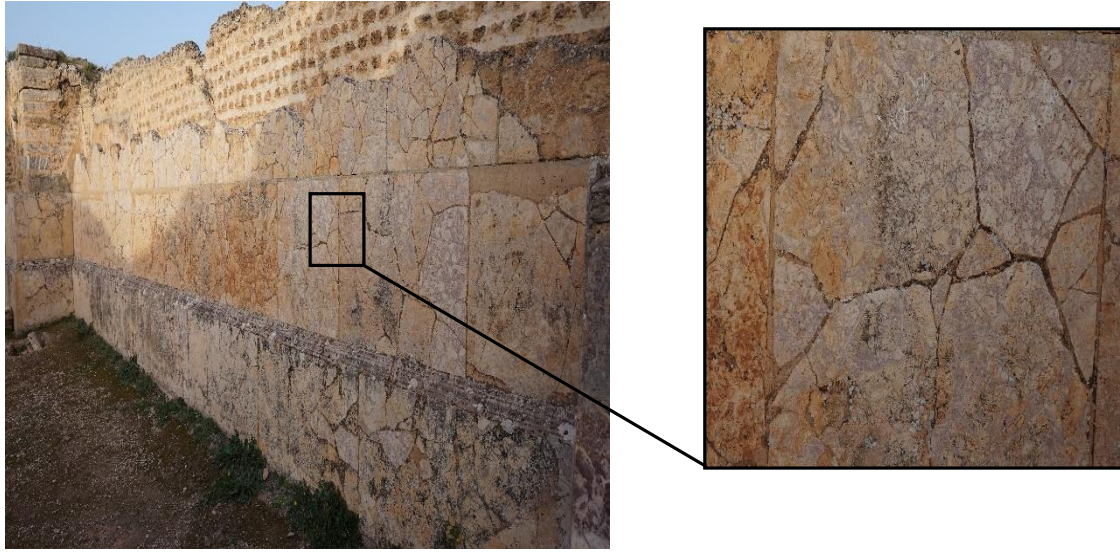
#### ج- حجر كلسي أحفوري ذو لون أصفر وردي باهت

لقد وجد هذا النوع من الرخام على شكل صفائح تزيين إحدى قاعات الحمامات الكبرى من الجهة الغربية (الصورة رقم 10).

(1)- Ibid , p 34.



## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء



الصورة رقم 10: جدران إحدى قاعات الحمامات الكبرى مغطاة

بالحجر الكلسي ذو اللون الأصفر الوردي

### د-حجر الترافونتين الألباستر

يُعد حجر الترافونتين الألباستر ذو اللون الأبيض العسلي والأحمر، خامة رخامية طبيعية من الجبس ذو الحبيبات الدقيقة، وهو نصف شفاف (Translucide)، يتميز بلون أبيض صافي أو مختلط مع اللون البني المحمر، يتكون من الكالسيت، كما يحتوي على تجاويف، أما الترافونتين الأكثر استخداماً في الموقع، فهو ذو لون أبيض عسلي، استخدم في عمل توابيت التماثيل، والأنصاب التذكارية، وبعض التكسيات الداخلية، ويعتقد أنّ مصدره الرئيسي محاجر عين السمارة المتواجدة جنوب شرق قسنطينة.

### III- مصدر حجارة بناء الموقع الأثري

لقد أفضت الدراسة التي قام بها Dessandier David وآخرون (2003) في إطار مشروع MEDISTONE<sup>(1)</sup> بهدف تحديد أنواع ومصدر الحجارة المستخدمة في بناء معالم الموقع الأثري لجميلة، إلا أنّ أغلبها جلبت من مقالع محلية كما هو موضح في (الجدول رقم 9) الذي بين الحجارة التي استخدمت بغرض البناء، في حين الحجارة التي استخدمت بغرض التزيين فجلبها جلبت من خارج البلاد، من آسيا الصغرى، وتونس، كما هو موضح في (الجدول رقم 10) الذي يبين مصدر وطبيعة الحجارة التي استخدمت بغرض التزيين.

(1)- Dessandier . D et All ; Ibid ,pp145,160.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

الرقم	نوع الحجارة الملاحظة في الموقع الأثري	طبيعة الإستخدام للحجارة		مصدر الحجارة (المقلع الحجري)	التكوين الجيولوجي
		الإستخدام	نوع البناء		
1	الحجارة الكلسية الصلبة ذات اللون الرمادي	رئيسي	توجد على شكل دبش، وكتل حجرية مصقولة وعناصر معمارية (أعمدة، بلاطات، أسكف وأكتاف للأبواب والنوافذ).	جبال جميلة (المقلع الحجري لجبل جميلة وكاف بن صالح، وسيدي سعدون)	كلس القبة السطافية السانونيان الأعلى Sénonien supérieure
2	الحجارة الجيرية البيوكلاست ذات اللون الرمادي والحبيبات الناعمة	متوسط	مستعملة في المدينة القديمة على شكل عناصر منحوتة وكورنيشات، وطاولات وأعمدة، وممرات في الكابتول، وسوق الإخوة كوزينيوس، وحول معبد العائلة السيفيرية، والساحة السيفيرية.	جبال جميلة (مقلع كاف بن صالح، وسيدي سعدون)	كلس القبة السطافية السانونيان الأعلى
3	التوف الكهفي (البيج الفاتح)	متوسط	استخدمت كدبش في جدران وأقواس الحمامات الكبرى والكابيتول، وكحجارة مصقولة بمعبد العائلة السيفيرية.	المقلع الحجري للحمام الدهامشة على الضفة الجنوبية لواد الزتين	التوف الحرماي hydrothermaux الزمن الجيولوجي الرابع
4	الحجارة الكلسية ذات اللون الرمادي البيج الفاتح	متوسط	متوزعة في كل أرجاء الموقع على شكل عناصر معمارية مختلفة وأحياناً عناصر منحوتة مثل الأتصاب والأعمدة، والتيجان، والأكتاف وأعتاب الأبواب.	الجهة الجنوبية لجبل الحلفة	Calcaire massif blanc a débris de Rudistes et ciment cristal. Cénomaniien

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

5	الترافونتين ذو الشكل دودي vermiculé المائل إلى الإخمراز	ضعيفة	على شكل أعمدة في مبنى بازليك كروسكونيوس (الحي المسيحي)	غير معروف	غير معروف
6	الحجارة الكلسية القوقعية البيج	ضعيفة	على شكل أعمدة في القاعات الباردة للحمامات الكبرى، وفي دهليز بازليك كروسكونيوس	غير معروف	غير معروف
7	حجارة الدولوميت ذات اللونين الرمادي والأحمر الطيني.	ضعيفة	على شكل بقايا أعمدة متساقطة على الأرض حول المسرح	غير معروف	غير معروف
8	حجارة الترافونتين الليثوكلاست الكبير المحاط بالرادبوليك المتحجر والمتصلب	ضعيفة	على شكل أعمدة متساقطة على الأرض حول المسرح	غير معروف	غير معروف
9	حجارة البريشيا الجبسي الوردي اللون والأرجواني ذو الليثوكلاست الكبير (الحجر الكلسي الدوليميتي)	غير معروف	لوحظت على شكل شظايا أعمدة ساقطة على الأرض حول معبد المجهول شرق معبد العائلة السيفيرية	غير معروف	غير معروف

الجدول رقم 9: مصدر أهم أنواع حجارة البناء المستخدمة وطبيعة الإستخدام (1)

(1)- Dessandier David et All, Ibid,p145.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

موقع المقلع الحجري	فترة الإستخدام للحجارة	طبيعة الإستخدام	المظهر	نوع الحجارة الملاحظة في الموقع الأثري
جنوب أيوبي في منطقة ستيرا كاريستوس جبل أوشي (اليونان)	استخدمت في روما بداية القرن الأول قبل الميلاد، ثم انتشر استخدامها في أنحاء الإمبراطورية الرومانية في عهد كل من الإمبراطور أدريان وأنتونين، وخلال الفترة البيزنطية	أعمدة، تكسية الجدران، التماثيل وأحواض الحمامات	- تتميز بخلفية خضراء فاتحة مع عروق داكنة، التورق يمكن أن يكون مستقيم أو متموج	مرمر الكريستيوم أو مرمرستريوم أو مرمرسيبولينو الأخضر
جبل موبسيون، شمال شرق لاريزا ومنطقة ثيسالي (اليونان)	استخدمت انطلاقاً من القرن الثاني بعد الميلاد حتى منتصف العهد البيزنطي	أعمدة، لوحات تكسية الجدران والأرضيات وأحواض الحمامات	خلفية خضراء زمردية مع بقع خضراء داكنة/سوداء وبيضاء، وأحياناً رمادية	مرمر ثيسليكوم أو الأخضر العتيق
من جزيرة سكيروس (أجهيوس بنتوليمون، تريس بوكاس، كورنزيس فلاكسو رويلا) اليونان	استخدمت في روما من قرن الأول قبل الميلاد حتى قرن الرابع ميلادي	أعمدة، أنصاب، تكسيه جدران وأسقف وأحواض الحمامات	خلفية بنية أو بيضاء أو مزخرف بألوان متعددة (أحمر، وردي، بني وأصفر)	مرمر سكيريتسيوم أو بريشيا
لاكوني بين كروكيا وستيفانيا (اليونان)	استخدمت في الفترة المينوية والميسينية، يحتمل أنه استخدم من طرف الرومان في القرن الأول قبل الميلاد.	استخدمت ككتل صغيرة، وفي تحضير المزهريات، وكتبليط، وكألواح للجدران وكورنيشات، وأعمدة صغيرة وتيجان.	أخضر فاتح أو مصفر أو ذو لون أخضر قاتم	البروفيدو الأخضر العتيق



## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

منطقة كوزاك 30 كلم شمال شرق بيرقام (اليونان)	استخدم محلياً في الفترة الهيلينية، واستمر في روما خلال القرن الثاني، وكذلك خلال العهد البيزنطي	أعمدة صغيرة ومتوسطة الحجم، استخدم لزخرفة الجدران والأرضيات، وأحواض صغيرة	النسيج متجانس، حبيبات دقيقة (1-3 ملم)	مرمر ميسوم أو غرانيت الميسيان
بوحنيفية معسكرة (الجزائر)	استخدم في روما في بداية عهد الإمبراطور سيفيروس	استخدم بشكل أساسي لتكسية أحواض الحمامات الصغيرة، والأسقف	خلفية حمراء، أحياناً يكون أكثر وضوحاً وانتظاماً، خطوط منحنية مع بقع بيضاء ووردية	ألباستر البارسلان الألباتر الكالسيستيك (الترفونتين الأحمر الملون بالهيماتيت)
شمطو (سميثو القديم ونوميدي، نوميديا) (تونس)	استخدم من طرف أحد ملوك نوميديا في القرن 3 ق م، جلب لروما في قرن 2 قبل الميلاد.	استخدم في تزيين العناصر المعمارية: أعمدة، تيجان صغيرة، دعامات، وبلاطات، وتمائيل صغيرة.	خلفية صفراء مع شرائح تقريبا بيضاء وصفراء قاتمة يشمل الوردي والبنفسجي غالباً ما يكون له نسيج البريشيا	مرمر نوميديسيوم أو (المرمر النوميدي) جبالو القديم (انتيكو)

الجدول رقم 10: أهم أنواع الحجارة التريينية المستخدمة في الموقع الأثري لجميلة ومصدرها وطبيعة استخدامها (1)

(1)- Dessandier David et All , Ibid,pp 145a160.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### IV- شكل وقياس القطع الحجرية

لا شك أنّ تنوع مواد البناء الحجرية للموقع الأثري لجميلة إنعكس بشكل واضح على عمارة المباني، وبشكل خاص، على مقاييس الحجارة، وذلك لإعطاء المباني صلابة أكبر وفخامة، حيث استخدمت بأشكال وأحجام مختلفة حسب وظيفتها في البناء.

#### IV-1- الكتل الحجرية

السمة الغالبة في هذا النوع من الحجارة أنها ذات حجم كبير وبأشكال وأبعاد مختلفة (مربعة، مستطيلة، شبه منحرف، نصف دائرية)، وأحياناً تكون مصقولة أو نصف مصقولة، وقد استعملت في الغالب لبناء العناصر الحاملة للمبنى من جدران، وإطارات الأبواب والنوافذ، وفي السلالم، نجد هذا النوع من الحجارة في كل من معبد سيفيروس، والحمامات الكبرى، وقوس كركلا، وغيرها من المعالم الأخرى، كما استخدمت في تبليط الأرضيات، وتعبيد الطرق وتهئية السّاحات العامة، ولقد تراوحت مقاساتها بين 40 x 50 x 70 سم و 80 سم، وأحياناً تتعدى 1 متر، فضلاً عن ذلك، فقد استخدمت كعناصر معمارية في شكل أعمدة وتيجان وكورنيشات وغيرها، كما تميزت بألوان متعددة من الرّمادي إلى الأصفر، ومن أهم أنواعها (الحجارة الكلسية الصّلبة، والبيوكلاست، والترافونتين).

#### IV-2- الدّبش أو الرّكام

استخدمت إلى جانب الحجارة المنحوتة الكبيرة الحجم، أنواع أخرى من الحجارة يطلق عليها الدّبش أو الرّكام، عبارة عن حجارة طبيعة قد تكون مصقولة بأشكال هندسية مربعة أو مستطيلة، أو غير مصقولة بأشكال عشوائية، لكنها بأحجام صغيرة ومتوسطة، وبشكل عام، فهي تستخدم في العمليات الإنشائية لإقامة الجدران، والعقود، والأسقف، ويكمن الهدف من استخدامها أولاً في ملء الفراغات بين الدّعامات الحجرية الكبيرة وفق ما يعرف بالتّقنية الإفريقية، حيث إذا بنيت الحوائط من الدّبش، تكون الزّوايا ومحيط الفتحات قائمة بكتل حجرية مصقولة كبيرة الحجم، أو من الآجر، وذلك لتحقيق المتانة واستقرار البناء، أما الهدف الثاني فهو اقتصادي بغرض الإقتصاد في مواد البناء وفي الجهد والمدة، فضلاً عن السّرعة في الإنجاز كون عملية البناء لا تتطلب سوى إفراغ وتركيب طبقات الدّبش واحدة تلو الأخرى، في حين الهدف الثالث يتمثل في إنجاز أشكال هندسية معقدة يصعب إنجازها بالكتل الكبيرة كالشكل السّداسي والدائري، والأسقف المقببة.

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

أما بخصوص أسلوب البناء فقد أُتبع الأسلوب الحر والمنتظم، حيث يكون السطح الخارجي حسن المظهر مصقول، بينما الجهة الداخلية تكون غير مصقولة، في حين المداميك تأخذ شكلاً متساوياً بارتفاع يتراوح من 40 إلى 60 سم، أما سمك الجدار فيتراوح من 60 إلى 120 سم، ويتم ربط هذه الحجارة بمادة رابطة قد تكون طينية أو جيرية.

### V- تقنيات بناء الموقع الأثري

تعددت طرق وأساليب البناء في كويكول، إذ تبرز هياكل مباني هذه المدينة خمسة تقنيات للبناء استخدمت بشكل أساسي تتمثل في:

#### 1-V- التقنية الإفريقية *Opus africanum*

تُعد التقنية الإفريقية من أساليب البناء القديمة الأكثر انتشاراً في شمال إفريقيا عامة وفي جميلة خاصة، حيث أنجزت بها أغلب مباني هذه المدينة، تقوم هذه التقنية على مبدأ توازن الحجارة بفعل ثقلها دون استخدام الملاط، يتم بناء الجدران باستعمال الدبش بحجم صغير أو متوسط، تتخللها فواصل من كتل حجرية مصقولة كبيرة الحجم تشكل دعائم أو أعمدة، فيظهر البناء منتظماً يمكن تمييز مداميكه بسهولة، ويمكن الوقوف على هذه التقنية في كل من الحمامات الكبرى، وفي الأحياء السكنية المجاورة مثل منزل باخوس، ومنزل كاستريوس، كما نجدها في أساسات بعض المباني الخاصة وفي الأسوار الدفاعية (الصور رقم 11) وفي الحي المسيحي في المعمودية (الصور 12).



الصورة رقم 12: تبين تقنية البناء الإفريقية في جدران المعمودية بالحي المسيحي



الصورة رقم 11: الأسوار الدفاعية بالحي القديم منجزة بتقنية البناء الإفريقية

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### 2-V- تقنية النّظام الكبير Opus quadratum

تقوم هذه التّقنية على استخدام قطع حجرية ضخمة منحوتة ذات شكل منتظم، تُرص في مداميك دون مادة رابطة، التّوازن والثّبات يحصل عن طريق الوزن الذاتي للحجارة وشكلها وموقعها في البناء، يتم ترتيب الحجارة في هذه التّقنية بشكل متناوب لتجنب الفواصل العمودية بحيث يتوسط كل كتلة حجرية مصقولة إلتقاء حافتي الكتلتين الوقعتين أسفلها، تصم الجدران لحمل القوى العمودية والأفقية كالرياح، ويكون مقاسات الحجارة تقريباً متساوياً، وقد استعملت هذه التّقنية بشكل كبير خلال القرن الرابع قبل الميلاد.

لقد شيّدت بهذه التّقنية العديد من المعالم، من بينها قوس النّصر، والحمامات الكبرى، والقوس (6) الذي بجوار معبد فينوس جنتريكس، والكابيتول كما يظهر في (الصورة رقم 13).



الصّورة رقم 13: تبين جدار منجز بتقينه النّظام الكبير على مستوى الكابيتول

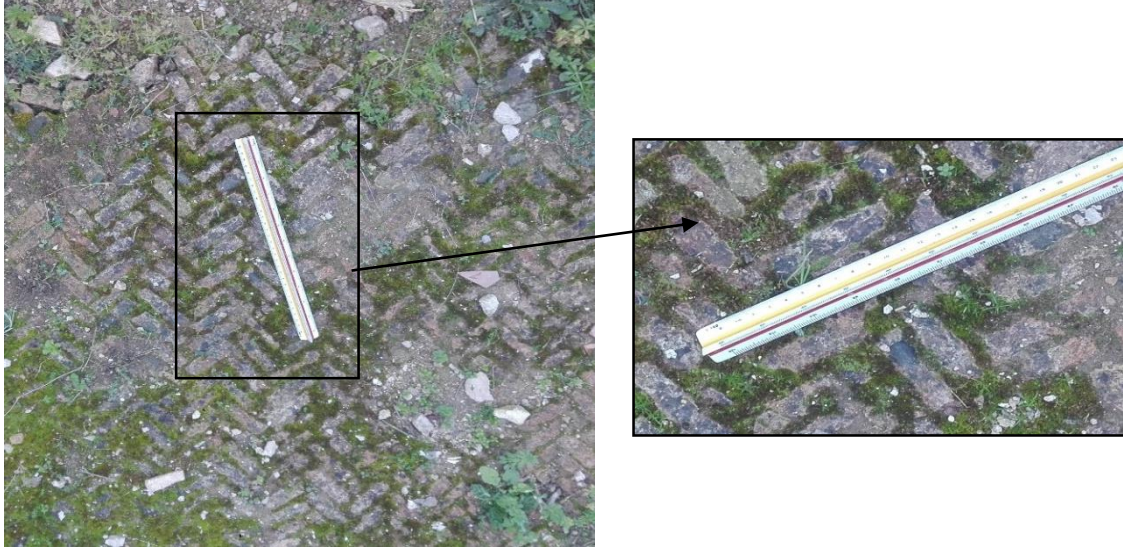
### 3- V- تقنية السّنبلّة Opus spicatum

يقوم هذا الأسلوب من البناء على رص القطع الحجرية أو الأجر بشكل طولي مائل، وأحياناً بصورة متناوية أو متعكسة، قد تأخذ شكلاً هندسياً أو على شكل سنبلّة، لذا تعرف بتقنية السّنبلّة، أو السّمكة، وهي تستخدم في بناء الجدران وتهيئة الأرضيات، فبالرغم من طابعها الجمالي إلاّ أنّه نادراً ما يتم اعتمادها في الجدران، وأحياناً تستعمل كعنصر جمالي في نهاية الجدران أو كحشوة لها، أما في جميلة فيلاحظ عدم استخدام هذه التّقنية في إقامة أو تزيين الجدران، لكنها استخدمت بشكل بارز كتبليط خاصة على مستوى



## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

أرضيات محلات سوق الإخوة كوزينوس (الصورة رقم 14) في شكل قطع حجرية ذات قياس 2 X 8 سم وسمك 3,5 سم، ركبت بشكل مائل بزاوية حوالي 45°.



الصورة رقم 14: تخطيط أرضية سوق الإخوة كوزينوس منجز بتقنية السنبلة

### 4-V- التقنية القائمة على قطع الأجر Opus testaceum

تعد من التقنيات المستعملة بشكل كبير في مباني جميلة، حيث تعتمد هذه التقنية أساساً على استعمال الأجر مع الملاط في إنجاز الجدران، والأقواس، وأكتاف ومساند الأبواب والنوافذ، كما استخدمت في تكسية الجدران والواجهات، وهي في العادة موجهة للمباني المائية، كالحمامات الكبرى (الصور رقم 15)، والمعمودية الصور رقم 16، وغيرها.



الصورة رقم 16: الجدران الخارجية للمعمودية منجزة بالتقنية القائمة على الأجر



الصورة رقم 15: قوس بالحمامات الكبرى منجز بالتقنية القائمة على الأجر

## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### 5-V- التقنية المركبة أو المختلطة Opus mixtum

هي تقنية تستخدم أكثر من مادة و/أو تقنية في إقامة أجزاء من البناء أو كل البناء أو بالتناوب، ويرجع ذلك لعدة أسباب، من أهمها حماية الأجزاء الهامة من البناء التي تكون معرضة لخطر العوامل الطبيعية والمناخية (كالمطار، والفيضانات) كقاعدة للبناء (الصورة رقم 17، و18)، أو لإضفاء الطابع الجمالي، إذ تقوم هذه الطريقة على إقامة صفوف متوازية من مواد متنوعة من حجارة صغيرة (الدبش) وكتل كبيرة منحوتة وآجر محروق، (الصورة رقم 19 و20)، أو بالتناوب وبوضعيات مختلفة عمودية أو أفقية، أو مائلة بتقنية السنبلة.



الصورة رقم 18: تبين استخدام أكثر من تقنية بناء (النظام الكبير، التقنية المختلطة) في إحدى جدران الحمامات الكبرى



الصورة رقم 17: تبين استخدام أكثر من مادة (حجارة مصقولة مع الدبش والآجر) بقاعات الحمامات الكبرى



الصورة رقم 20: تبين جدار منجز بتقنية البناء المختلطة (التقنية الإفريقية مع الآجر) في مبنى معبد فينوس جينيتريكس



الصورة رقم 19: تبين استخدام أكثر من مادة (الكتل الحجرية مع الدبش والآجر) الجدار الغربي لمعبد جينتركس



## الفصل الثاني: عموميات حول حجارة الموقع الأثري وتقنيات البناء

### الخلاصة:

تُعدّ الحجارة من أقدم المواد الطبيعية التي استخدمها الإنسان كمادة للبناء منذ العصور القديمة، وهي تنقسم إلى ثلاثة أنواع: نارية، متحولة، ورسوبية، وكل منها تتفرد بجملة من الخصائص الجمالية فضلاً عن الصلابة والمقاومة.

أما في الموقع الأثري لجميلة فلقد تعددت الحجارة المستخدمة في بناء معالمه، والتي يمكن تقسيمها حسب طبيعة الاستخدام إلى مجموعتين: الأولى تشمل حجارة البناء، والتي تتميز بالصلابة والمتانة، وهي بدورها تضم تسعة أنواع، أربعة استخدمت بصفة رئيسية، وخمسة بصفة ثانوية، تتمثل الحجارة التي استخدمت بشكل كبير في الحجارة الكلسية الصلبة ذات الحبيبات الناعمة واللون الرمادي، تليها الحجارة الكلسية من نوع البيوكلاست الرمادي ذات الحبيبات الناعمة، ثم الحجارة الكلسية من نوع التوف الكهفي الرمادي البيج الفاتح، والحجارة الكلسية ذات اللون الرمادي البيج الفاتح، أما المجموعة الثانية فتتمثل في الحجارة التزيينية، والتي تضم أنواعاً مختلفة من الرخام والحجارة.

لقد ساهم التنوع في مواد البناء الحجرية في تعدد تقنيات البناء التي منحت طابعاً معمارياً مميزاً للمدينة الأثرية، إذ يمكن تمييز وجود خمسة تقنيات، تقنية النظام الكبير، والتقنية الإفريقية، والتقنية المختلطة، إلى جانب تقنية تقوم على استخدام الآجر، هذه التقنيات استخدمت بشكل كبير في إقامة هياكل البناء، بالإضافة إلى تقنية السنبلة التي استخدمت في تبليط الأرضيات.

وكنتيجة عامة، فإن الحجارة الكلسية المستخدمة في الموقع الأثري لجميلة مازالت لحد الآن صامدةً في وجه الزمن، لكن تبقى التساؤلات المطروح:

- إلى متى تستطيع هذه الحجارة المشكلة للمعالم الأثرية لهذا الموقع الأثري الصمود؟
- وما العوامل التي يمكن أن تؤثر على ديمومتها؟
- وكيف يمكن الحفاظ على سلامتها وديمومتها؟



## الفصل الثالث:

# عوامل ومظاهر تلف الحجارة

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

تخضع الحجارة الأثرية المشكلة لهياكل المباني الأثرية للعديد من عوامل التلف حسب النطاق الجغرافي الذي تقع فيه، إذ يتفاوت تأثيرها وفق العامل وشدته وديمومته وتفاعلاته، ومن جهة أخرى حسب صلابة الحجارة، وعليه فتشخيص المشاكل التي تعاني منها هذه الحجارة الأثرية وفهم أصلها يعد من العمليات البحثية الهامة في مجال الحفاظ على الآثار، وفي سياق ذلك سنحاول في هذا الفصل إلقاء الضوء على أبرز عوامل التلف التي تتعرض لها الحجارة الأثرية بشكل عام وحجارة الموقع الأثري لجميلة بشكل خاص، وتشخيص مظاهر التدهور الناتجة عنها.

### I. عوامل تلف الحجارة

تعد الحجارة إحدى أهم مواد الطبيعية التي استخدمها الإنسان منذ القديم في أغراض البناء، وهذا ما دلت عليه العديد من المخلفات الأثرية المنتشرة في مختلف ربوع العالم ومن بينها الجزائر، إلا أنها مثل جميع المواد الأخرى تتعرض لعوامل تلف متعددة متولدة من البيئة المتواجدة فيها، والتي تعمل على إضعافها بشكل مستمر قد تؤدي في النهاية إلى اندثارها كلياً، ويمكن إجمالها في عوامل تعمل على إضعافها من الداخل، وعوامل تهاجم من الخارج.

#### I-1- عوامل متعلقة ببنية للحجارة

يقصد بها تلك العوامل البنية الداخلية التي تلعب دوراً في تحديد الخواص البيتروفيزيائية للحجارة، والتي تتحكم في مقاومتها، فلا عن تعزيز تدهورها، يمكن إجمال أهمها فيما يلي:

#### I-1-1- التغيرات في التركيب المعدني

يلعب التركيب في التركيب المعدني للحجارة دوراً كبيراً في تعزيز وتحفيز العديد من آليات التلف، والتي يتضاعف تأثيرها إذا تعرض هذا التركيب المعدني لتغيرات فيزيوكيميائية سلبية تجعله يفضل تحفيز وتعزيز العديد من آليات التلف الفيزيائية و/أو الكيميائية<sup>(1)</sup>.

كما تساهم التركيب المعدنية بشكل كبير في تحديد طبيعة خواص الحجارة وجودتها، والتي على أساسها يمكن تقدير درجة صلابتها ومقاومتها، ومدى تأثيرها بعوامل التلف، ومن أبرز الخواص المرتبطة بالتركيب المعدنية نذكر:

(1) - محمد عبد الهادي، مرجع سابق، ص 91.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

- **ذوبانية المعادن:** تمتلك الحجارة ذوبانية أو انحلالية غير متجانسة نظراً لاختلاف صلابة المعادن المتشكلة منها، فعلى سبيل المثال قابلية ذوبان الكوارتز  $\text{SiO}_2$  منخفضة كثيراً، إذ تقدر بستة أجزاء في المليون في المياه، بينما كربونات الكالسيوم  $\text{CaCO}_3$  فهي أكثر قابلية للذوبان بحوالي 2000 جزء في المليون<sup>(1)</sup>.

كما تزداد عملية الذوبان للتركيب إذا كانت المياه حامضية ( $\text{pH} > 7$ )، وبذلك تلعب هذه الخاصية دوراً كبيراً في إضعاف البنية الداخلية للحجارة مما تؤثر على صلابتها، وهذا ما أكدته Mélanie Denecker<sup>(2)</sup> أن عملية الذوبان تعمل على إذابة المكونات المعدنية القابلة للذوبان في الماء، كما تعمل على إحداث تغييرات في التركيب المعدني الصلب، الذي يصبح أقل صلابة وأكثر هشاشة، الأمر الذي ينتج عنه العديد من الأضرار، منها ما تكون سطحية كانهلال وتشكيل تجاويف وثقوب بأشكال وأحجام مختلفة، أو يكون فعلها داخلياً بحيث يساهم في تحويل المكونات الصلبة لمكونات هشة ضعيفة الصلابة سهلة الانحلال.

- **تمدد وانكماش المعادن:** تعد هذه الخاصية مسؤولة بشكل مباشر عن التشققات التي تحدث للحجارة، لأن تمدد وانكماش بلورات المعادن يتم بشكل متفاوت وفق درجات الحرارة وطبيعة التركيب المعدني<sup>(3)</sup>، وقد أشار Philippe Bromblet<sup>(4)</sup> إلى أن الحجارة الغنية بالمعادن التي لها قابلية تمدد حراري كبير تتعرض بدورها إلى معدلات تمدد وتقلص بشكل مرتفع، مما ينتج عنه أضرار بالغة الخطورة يصعب في كثير من الحالات علاجها، أما الحجارة التي تتكون من معادن ذات قابلية تمدد وانكماش منخفض تكون أقل تدهوراً.

ومن خلال ما سبق نستخلص أن التركيب المعدني يلعب دوراً كبيراً في صلابة الحجارة من خلال تحكمه في ذوبانية وتمدد وانكماش المعادن المكونة للحجارة، مما يعزز التدهور خاصة المرتبط بفعل الماء أو بفعل التغيرات في درجات الحرارة، الأمر الذي ينعكس على سلباً

(1)-Saad Alice, influence du changement climatique et des conditions extrêmes sur les massifs fractures, rôle des fluides dans leur processus d'altération, Thèse de doctorat, université Paris- est, France, 2011, p28.

(2)-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 de doctorat, Université de Cergy Pontoise, France, 2014, p35.

(3)- Saad Alice, Op.cit, p31

(4) -Philippe Bromblet, Guide « Altérations de La Pierre » Association Medistone, France, 2010, p19

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

على صلابتها ومقاومتها، لتستسلم للإِنحلال والتشريح والتشقق، ما يشكّل نقاط ضعف تكون الوسط المفضل للعديد من عوامل التآلف، والأخطر من ذلك، هذه الشقوق والتجاويف قد تنتشر وتتسع مما يفقد الحجارة تماسكها كلياً، لذا فمعرفة تكوينها المعدني يمكن من معرفة وفهم سبب التدهور الذي يصيبها، فضلاً عن اختيار العلاج المناسب.

### I-1-2- المسامية

تُعتبر المسامية شكلاً من أشكال عدم الإستمرارية، فضلاً عن أنها خاصة مؤثرة بشكل كبير في درجة صلابة الحجارة ومقاومتها، فضلاً عن تعزيزها لتدهورها، من خلال مساهمتها في تخزين ونقل وتوزيع السوائل وما تحمله من أملاح إلى أماكن مختلفة من جسم الحجارة، والتي تتسبب في تحفيز العديد من آليات التآلف سواء الكيميائية أو الفيزيائية (انحلال وتبلور الأملاح تجمد ذوبان الماء)، والتي تساهم في إضعاف وإتلاف البنية الداخلية لهذه الحجارة<sup>(1)</sup>، فعلى سبيل المثال الحجارة التي تحتوي على نسب كبيرة من المسامات الصغيرة التي يكون قطرها أقل من 0,5 ملم تكون أكثر تأثراً من التي تملك مسام كبيرة، كون هذه الأخيرة تسمح للمسام الأصغر منها بامتصاص محاليلها، فهي بهذا تشكّل مصدر إمداد دائم للماء، وبذلك تعزز تشبع الطبقات السطحية، مما يحفز ويعزز ويضاعف من الفعل الإتلافي للأملاح والجليد<sup>(2)</sup>، فضلاً عن ذلك، قد تتعرض هذه المسامية للتغير السلبي بفعل عوامل التآلف يفقدها جودتها مما ينعكس سلباً على باقي خواص الحجارة، حيث تناقص بازدياد المسامية:

### I-1-3- النسيج

يُعد النسيج من العوامل المساهمة في تعزيز تلف الحجارة، حيث ينتج عن عدم تجانسه سلوك غير موحد اتجاه التآلف، وبذلك يكون تطور التدهور تفاضلي بحيث يجعل مظهر الحجارة غير متجانس، تبرز منه مظاهر تلف مختلفة من انكماش وثقوب وتصدعات وتفتك وتقرح وتورق الحجارة، ناهيك عما يوفره النسيج من بيئة ملائمة لنمو النباتات وتكاثر الكائنات الدقيقة<sup>(3)</sup>، عموماً يمكن القول، أنه كلما كان نسيج الحجارة ذو حبيبات كبيرة الحجم كانت قابليتها للتدهور أكبر، كما قد يتعرض هذا النسيج للتدهور مما يضاعف من تدهور الحجارة.

(1) - Ipid, p.21

(2) -Mélanie Denecker, Op.cit, pp 35-36.

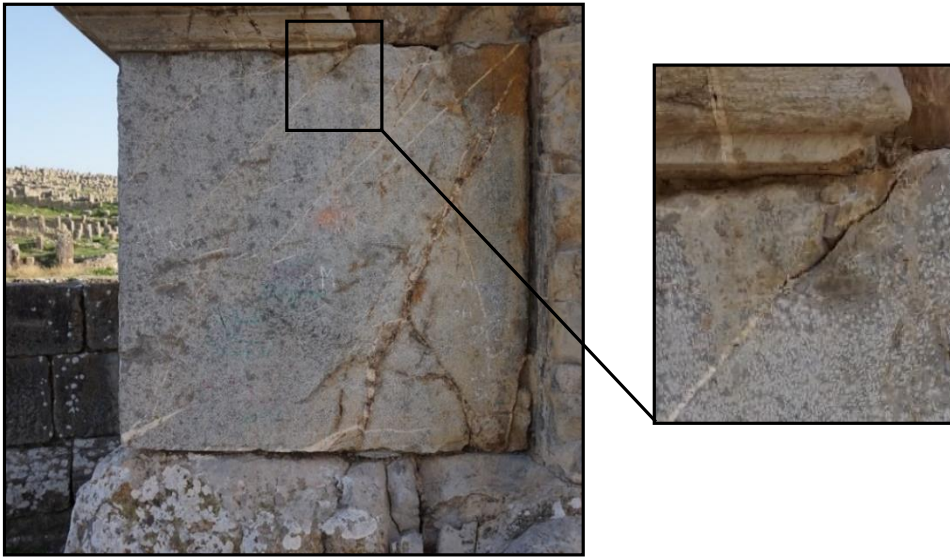
(3) -Philippe Bromblet, Op cit, p20.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### I-1-4- الفواصل والعروق

لا شك أنّ الحجارة أثناء تكوينها تكتسب عروقاً (veines) وفواصل (Joints) تقطع استمرارية تجانسها، وهي بذلك تُعد مستويات انفصال، تكون أكثر وضوحاً في الصّخور الرسوبية<sup>(1)</sup>، وتكمن خطورتها في إمكانية توسعها مما تؤدي إلى انفصال الأجزاء عن بعضها البعض، هذا ما بينه Marion Bost أنّ عملية انفصال الحجارة ترتبط بشكل كبير بوجود مستويات الانفصال التي تنتشر وتتوسع تحت الفعل المشترك للضغوط الميكانيكية والتغيرات الفيزيوكيميائية إلى أنّ تصل إلى مرحلة التمزق والتفكك الكلي، وبهذا يتشكّل سطح جديد يتعرض لدورة تلف جديدة<sup>(2)</sup>، كما يمكن للماء أن يستغلها كمرات يتسرب من خلالها لداخل الحجارة، مما يزيد من درجة تشعبها مما يضاعف من الفعل الإتلافي للجليد.

أما بخصوص تأثير هذا العامل على حجارة الموقع الأثري لجميلة، فلا يمكن إغفاله إذّ يلاحظ في أغلبها انتشار كبير للعروق، تأخذ ألوان متعددة من الأبيض، المغرة، مما أدى إلى انتشار الشقوق وانفصال كثير من أجزاء الحجارة، وهذا ما أعطى مظهراً مشوهاً، ومن جهة أخرى، شكلت نقاط ضعف في الجدران جعلها مهددة بخطر الإتهيار (الصورة رقم 21).



الصورة رقم 21: تبين تشقق الحجارة على مستوى العروق في قاعدة قوس كركلا

(1)- خلف حُسين الذُلَيْمي، الجيومورفولوجيا التّطبيقيّة، علم شكل الأرض التّطبيقي، الأهلية، الأردن، 2001، ص ص 72-74.

(2)- Marion Bost, Ahmad Pouya, François Martineau, Effets mécaniques du gel sur l'évolution d'une fissure dans un bloc de calcaire, Journées Nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, France, 2006, p33.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### I-1-5- الشقوق

لا شك أنّ الحجارة التي تمتلك شقوقاً لديها خواص تختلف عن حالتها السليمة التي لا تمتلك شقوق، وهذا ما أكدته Saad Alice بأن نسبة الإمتصاص على مستوى الشق تكون أعلى بكثير منه في الأجزاء السليمة، في حين المقاومة الميكانيكية تكون أدنى بكثير منها في الأجزاء السليمة، كما أنّ الشكل الهندسي للشق وعمقه له تأثير كبير في توليد الإجهادات<sup>(1)</sup>، لذا فالشق يساهم بشكل كبير في تحفيز مختلف عمليات التآلف (الفيزيوكيميائية أو البيولوجية)، من خلال توفيره لبيئة ملائمة لنمو وتكاثر الكائنات الدقيقة، وهذا ما يفسر انتشار مظاهر التآلف المختلفة على مستوى هذه الشقوق من تساقط الشظايا أسفل الجدران، فضلاً عن التصدع وغيرها من المظاهر، لذا يستحسن علاج هذه الشقوق قبل تفاقمها.

### I-2- عوامل التآلف الخارجية

تعكس العوامل الخارجية الظروف البيئية المحيط بالحجارة، كالمناخ، التلوث، والنشاط البيولوجي، وهي تتميز بتنوعها وبقدرتها على اضعاف الحجارة بما تحفزه من آليات التآلف الميكانيكية و/أو الفيزيوكيميائية، كما قد تعمل هذه العوامل منفردة أو مجتمعة في إحكام دائرة التآلف، والتي تؤدي إلى اندثار الأثر نهائياً أو إيصاله إلى مراحل متقدمة من الضعف، لذا فمعرفة مساهم في اختيار أفضل أساليب العلاج والوقاية، ومن أخطر هذه العوامل نذكر:

### I-2-1- العوامل الميكانيكية

يقصد بها تلك العوامل التي تسبب تآكل وتفتك الحجارة دون إحداث أي تغيير في تركيبها الكيميائي والمعدني، وفيما يلي نلخص أهم هذه العوامل:

### I-2-1-1- الزلزال والإهتزازات

يُعتبر الزلزال من أخطر عوامل التآلف الميكانيكية، إذ يتفاوت فعله الإتلافي حسب قوته ومدته، ومدى ملاءمة تصميم البناء لمقاومة الزلازل<sup>(2)</sup>، ويكون تأثيره كبيراً على المباني الأثرية لقدمها وضعفها<sup>(3)</sup>، قد يؤدي لإنهيار جزئي أو كلي للبناء، أو يترتب عنه تشققات وتصدعات

(1) -Saad Alice, Op cit , pp27, 31.

(2) -عبد القادر عابد، غازي سفاريني، أساسيات علم البيئة، دار وائل للنشر، الأردن، 2002، ص ص 39-43.

(3) -احمد إبراهيم عطية، ترميم السفيساء الأثرية، دار الفجر للنشر والتوزيع، القاهرة، 2003، ص 79.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

لهيكل البناء بأحجام وأشكال وإتجاهات مختلفة، كما قد يحدث ميلان للجدران الأمر الذي يتسبب لاحقاً في انهيار المبنى كلياً (1).

أما بخصوص تأثير الزلزال على الموقع الأثري لجميلة، فقد بينت العديد من الدراسات تعرضه عبر تاريخه للعديد من الموجات الزلزالية أقدمها كان بين عام 365 م و419 م، والتي أدت إلى فقدان العديد من المباني، أما أحدثها فكان سنة 1977م، الذي خلف أضراراً كبيرة، فقد تسبب في تشقق وتصدع الكثير من المباني القديمة منها والحديثة (2)، وهذا ما يفسر التشققات والتصدعات المنتشرة على الجدران والهيكل المتساقطة، وبناء على الدراسات التي قام بها المختصون في الزلازل، فقد تم تصنيف مدينة جميلة ضمن منطقة النشاط الزلزالي رقم (II).

### I-2-1-2-الأحمال الميكانيكية

يرتبط هذا النوع من الضرر بشكل مباشر بمدى صلابة الحجارة، لذا يفضل أن تمتلك هذه الأخيرة صلابة جيدة، فضلاً عن قدرة جيدة لحمل وتحمل الأحمال والثقيل وقوى الضغط الواقعة عليها دون أن تتأثر، إلا أنه قد تتناقص هذه الصلابة والقدرة نتيجة تعرضها لعوامل التلف، مما يسبب تشققاً وتصدعاً وانفصالاً لأجزاء منها، وهذا ما يلحق بمرور الوقت بهيكل المبنى الأثري المتشكّل منها أضراراً بالغة الخطورة يصعب في كثير من الأحيان علاجها، وترجع الأسباب الأكثر شيوعاً إلى سوء ملء الفواصل بين الحجارة، أو استخدام ملاط غير كافي، أو وضع الكتل الحجرية بطريقة غير صحيحة تفقدها مقاومتها الميكانيكية (3).

وبالنظر إلى معظم حجارة معالم هذا الموقع الأثري، يلاحظ انتشار كثير من الشقوق فضلاً عن تصدع وانفصال أجزاء من الكتل الحجرية في العديد من معالم الموقع الأثري، في كل من المسرح (الصورة رقم 22)، وقوس كركلا (الصورة رقم 23)، كما يلاحظ ميلان العديد من الجدران الداعمة أو الساندة للمنحدرات كما يظهر في الجدران الجنوبية للحمامات الكبرى نتيجة زيادة الدفع الميكانيكي الأفقي للتربة (الصورة رقم 26).

(1)-Institut Universitaire des métiers et du patrimoine, Les pathologies dans le bâti ancien, France, 2011, p 04

(2)-Kaabeche Tahar, Mebrak Abderraouf, contribution à l'étude des risques naturels (sismiques et mouvements de terrain) dans la wilaya de Sétif, mémoire de d'ingénieur en géologie, université Sétif, 2010, pp 56-57.

(3)- Kevin Beck, étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires a forte porosité , thèse de doctorat science des matériaux, université d'orléans, France,2006,p13.



## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة



الصورة رقم 22: توضح تشقق الحجارة تحت تأثير الأحمال في أحد جدران المسرح



الصورة رقم 23: توضح تشقق الحجارة تحت تأثير الأحمال

على مستوى دعائم قوس كركلا

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### I-2-1-3- الرياح

لقد بنيت العديد من الدراسات في مجال الصيانة والترميم أن الرياح عامل رئيسي من عوامل التلف المناخية، إذ يزداد خطرها عند اقترانها بعوامل أخرى كالحرارة والتساقط، فضلاً عن الرطوبة والتلوث، وهذا ما أشارت إليه Saad alic، بأن الرياح تلعب دوراً كبيراً في تغيير كل من درجات الحرارة، الرطوبة، واتجاه التساقط بصورة تؤثر على درجة تشبع وجفاف الحجارة<sup>(1)</sup>، كما تساهم في زيادة معدلات التجمد والذوبان للمحتوى المائي للحجارة، ونسبة التبخر والتبلور السريع للأملح مما يفقد هذه الحجارة صلابتها وبالتالي ديمومتها<sup>(2)</sup>.

وتتجلى ميكانيكية تلف الحجارة بفعل الرياح في التلف الفيزيائي بفعل الحبيبات التي تحملها الرياح والتي تعد كمناشير تعمل على نحر وكشط أسطح الحجارة، ومن أبرز آثاره السلبية تكوين فجوات وثقوب وخطوط غائرة، وتآكل وتعرج أسطحها الخارجية بدرجات متفاوتة<sup>(3)</sup>، هذا التآكل غالباً ما يشار إليه باسم Alveolisation<sup>(4)</sup>.

أما شكل التآكل وشدته فيرتبط بدرجة أولى بصلابة الحجارة، ثم بطبيعة العناصر الصلبة التي تحملها الرياح، فضلاً عن سرعتها التي تكسبها القدرة على الكشط والنحر، لذا فكلما زادت سرعتها عظم نشاطها، كما ترتبط شدة التآكل أيضاً بنوعية الحجارة وحالة حفظها، حيث كلما كان السطح متفككاً أو هشاً كلما كان تأثير الرياح أكبر، كذلك مدة التعرض واتجاه الرياح تلعب دوراً في تحديد شكل التآكل وحجمه، وهذا ما أكده سلمان أحمد المحاري، بأن التآكل يكون في صورة تجاويف دائرية إذا كانت الرياح عمودية، أما إذا كانت موازية للسطح فيكون عندئذٍ التآكل في شكل خطوط مستقيمة عميقة أو غائرة<sup>(5)</sup>.

(1)- Ipid, p21.

(2)- فوزية سعاد بوجلابة، أخطار التلوث البيئي على المعالم الأثرية بمدينتي وهران وتلمسان، أطروحة دكتوراه، جامعة أبي بكر بلقايد، تلمسان، 2015، ص36.

(3)- محمد عبد الهادي، مرجع سابق، ص92.

(4)-Alain Lootvoet, les pierres altération- traitements, ministère de l'urbanisme du logement et des transports, France, 1986, p26.

(5)- سلمان احمد المحاري، المواقع الأثرية في مملكة البحرين، المشاكل والتحديات مقترحات الترميم والصيانة، الموسوعة العربية للدراسات والنشر، ط1، 2009، ص 154.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

في حين الفعل الكيميائي للرياح يكمن في قدرتها على حمل ونقل الغازات الملوثة وترسيبها على جسم المباني الأثرية، والتي تتحول لاحقاً في وجود الرطوبة و/أو الأمطار لأحماض متفاوتة القوة، لها القدرة على إضعاف وتفكيك وتحويل المكونات المعدنية الصلبة للحجارة الى مكونات هشة سهلة التحلل والإزالة، ناهيك عن دورها في تنشيط التلف البيولوجي من خلال نقل ونشر الكائنات الدقيقة وبذور النباتات في مسامات وشقوق وفجوات الحجارة، والتي تنمو لاحقاً في وجود مصدر للمياه، مما تتسبب في تلف فيزيائي و/أو كيميائي (1).

وبشكل عام يمكن إجمال أبرز التأثيرات المرتبطة بسرعة الرياح في الجدول رقم 11.

سرعة الرياح (كلم /سا)	الوصف	التأثير
من 0 إلى 1,5	لا يشعر بها	إرتفاع الدخان رأسياً
من 4 إلى 7	يشعر بها	يميل الدخان في اتجاه السرعة
من 9 إلى 12	نسيم خفيف	إهتزاز أوراق الأشجار
من 23 إلى 35	رياح خفيفة	رفرفة الأعلام، أثارة الغبار، اهتزاز الأغصان
من 47 إلى 59	رياح متوسطة	إثارة الغبار واهتزاز الأغصان بقوة
من 70 إلى 82	رياح قوية	اهتزاز الأشجار بكاملها وتكسير الفروع
من 94 إلى 106	رياح عاصفة	خلع الأشجار
من 118 إلى 140	إعصار	أضرار عامة بالمواقع والمنشآت

### الجدول رقم 11: يوضح توزيع تقريبي لسرعة الرياح وتأثيراتها (2)

أما بخصوص تأثير الرياح على الموقع الأثري لجميلة، فبالإطلاع على سجلات الأرصاد الجوية لمنطقة جميلة المبينة في الفصل الأول، الذي يتضح من خلالها أنّ متوسط سرعة الرياح خلال أشهر السنة تصل إلى ما يقارب 10 كم/سا، وقد تصل أحياناً إلى أكبر من 50 كم/ساعة (3)، مما يساهم في تعزيز الأضرار بمكونات الموقع الأثري، حيث يُعزى

(1) -محمد عبد الهادي، مرجع سابق، ص 92.

(2) - أحمد سلمان، حفظ المباني التاريخية، مرجع سابق، ص 122

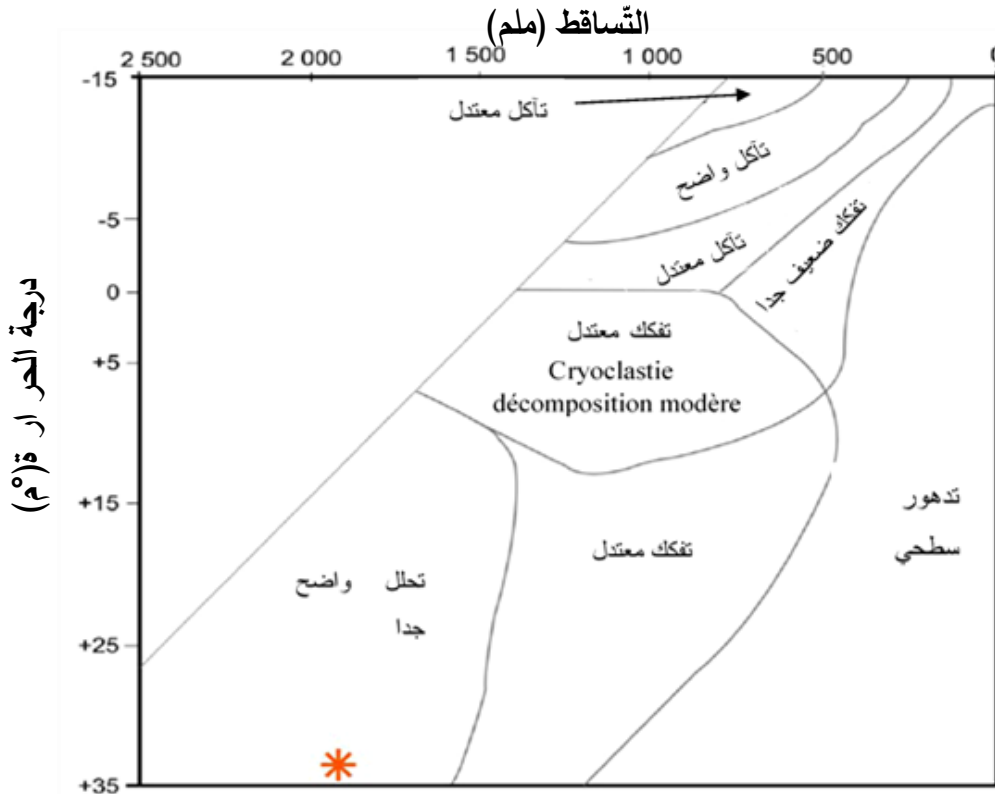
(3) - الديوان الوطني للأرصاد الجوية بالجزائر بالعاصمة.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

للرياح كثير من مظاهر التآكل الملاحظة على حجارة الموقع الأثري من تآكل أسطح الجدران، وفقدان بعض الزخارف والعناصر البارزة، وتشكل فجوات (الصورة رقم 68)، وتساقط الأجزاء الضعيفة والغير المحمية خاصة تلك المنجزة بحجارة التوف كما يظهر في (الصورة رقم 64)، بالإضافة إلى وجود بعض الإتساخات والأترية المتراكمة على هياكل المباني الأثرية، إلى جانب نمو الأعشاب في شقوق الجدران، لذا يفضل حمايتها باستخدام مصدات للرياح، لأنه في حالة العكس، يستمر التدهور مما يفقد هذه الشواهد الأثرية قيمتها.

### I-2-1-4 - التغيرات في درجة الحرارة

تؤدي التغيرات في درجات الحرارة اليومية و/أو الفصلية إلى حدوث الكثير من المضاعفات والإضطرابات الفيزيوكيميائية لحجارة المباني الأثرية، فضلاً عن تحفيزها للتلف المتسارع والتغير في الحجم، حيث وفق Rana Azzedine<sup>(1)</sup> توجد تأثيرات متزامنة لتدهور الحجارة مع دورات التغير في درجات الحرارة والتساقط (الشكل رقم 11).



الشكل رقم 11: يبين التأثير المتزامن لدرجة الحرارة والتساقط في تلف الحجارة (2)

(1)- Rana, Ezzedine, endommagement des monuments historiques en maçonnerie, thèse de doctorat, université Bordeaux I, France, 2009, pp 36,43.

(2)- Ipid p34 .



## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

زيادة على ذلك، تلعب درجة الحرارة دوراً بارزاً في تنشيط التآلف الكيميائي، وذلك بتأثيرها المباشر على عملية الإذابة، إذ مع ارتفاعها يزداد معدل التفاعلات الكيميائية، ومع انخفاضها تزداد ذوبانية  $CO_2$  في الماء، مما يساهم في إذابة الكالسيت<sup>(1)</sup>، بالإضافة إلى دورها في تغيير التركيب الداخلي للحجارة من خلال تحويل المعادن الصلبة لمعادن هشة، كتحويل الجبس اللامائي ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) لجبس مائي (أنهدريت  $CaSO_4$ ) سريع الذوبان<sup>(2)</sup>. أما التآلف الفيزيائي فيحدث نتيجة الضغوط المتولدة، إما بفعل تجمد الماء الموجود في مسامات وشقوق الحجارة عند انخفاض درجة الحرارة إلى ما دون  $0^\circ C$ ، حيث تزداد شدة هذه الضغوط مع استمرار انخفاض درجات الحرارة وزيادة تشبع الحجارة، إلى أن تصل لدرجة تفوق قدرة تحمل ومقاومة الحجارة لهذه الضغوط، لتنتهي في الأخير وتستهلك للتشقق والتصدع والإنفضال<sup>(3)</sup>.

ويحدث التآلف الفيزيائي أيضاً بسبب اختلاف في معادلات التمدد الحراري والإنكماش لمعادن الحجارة، فالتسخين والتبريد المتكرر الناتج عن التغيرات في درجات الحرارة يؤدي إلى ما يعرف بالتعب أو الإجهاد الفيزيائي، والذي يتراكم تأثيره بمرور الزمن، فإذا لم تتمكن الحجارة من احتواء هذا الإجهاد نتيجة التمددات والتقلصات المتكررة يتولد عندها ضغوط متزايدة، فإذا تجاوزت هذه الضغوط مستوى الإجهاد الذي يطلق عليه عتبة التعب، تتشقق وتتصدع هذه الحجارة وقد تتحطم كلياً<sup>(4)</sup>.

وقد أشار سلمان أحمد المحاري إلى أن خطر هذا العامل يزداد في حالة وجود مواد مختلفة الخواص (تمدد المعادن والتوصيل الحراري)، فعلى سبيل المثال معامل التمدد للملاط الجبسي هو أكبر من معامل تمدد الحجارة الجيرية بخمسة مرات، لذا يكون تدهوره أشد وأسرع من الحجارة الجيرية<sup>(5)</sup>.

(1)- Saad Alice, Op cit, pp, 20-21

(2)- سلمان أحمد المحاري، حفظ المباني التاريخية، مباني مدينة المحرق، المركز الإقليمي لحفظ التراث الثقافي في الوطن العربي (إيكروم - الشارقة)، الإمارات العربية المتحدة، 2017، ص 109.

(3)- جودة حسن جودة، أسس الجغرافيا العامة، منشأ المعارف الإسكندرية، 2004، ص ص 136، 135.

(4)- Rana Ezzedine, Op cit, pp 36-37.

(5)- سلمان احمد المحاري، حفظ المباني التاريخية، مرجع سابق، ص 110.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

ووفق محمد عبد الهادي فالحرارة المرتفعة تعمل على زيادة معدل التبخر، وبالتالي زيادة معدل تبلور الأملاح داخل طبقات الحجارة أو تزهرها على السطح<sup>(1)</sup>، كما يلعب التشميس دوراً في تحفيز النشاط البيولوجي من خلال توفيره لبيئة محفزة لنمو الكائنات الدقيقة والنباتات<sup>(2)</sup>. وقد اتضح لنا أنّ هذه المظاهر منتشرة بشكل كبير في الموقع الأثري لجميلة نظراً لطبيعة المناخ، فحسب سجلات الديوان الوطني للأرصاد الجوية لمنطقة جميلة الخاصة بدرجة الحرارة، والتي يتبين منها بأنّ فارق درجة الحرارة اليومي في فصل الصيف يصل إلى 9°م، أما بين فصل الشتاء والصيف فيصل إلى 20°م<sup>(3)</sup>، وبالرغم من أنّه فارق بسيط، إلاّ أنّه يشكل خطراً على حجارة الموقع الأثري.

ويمكن إجمال أهم مظاهر تلف حجارة الموقع الأثري الناشئة عن التباين في درجات الحرارة، في التشققات الأفقية والمائلة، فضلاً عن النجمية، والتفكك الحبيبي والتي تؤدي إلى انفصال أجزاء من الكتل الحجرية في مواضع مختلفة في هيكل المعالم كما يظهر في المعبد السيفيري تشقق وتصدع المداميك السفلية (الصورة رقم 53)، وغيرها من المعالم (المسرح، تبليط الأرضيات للشوارع والساحات،...) إلى جانب تشكل ترسبات ملحية في شكل طبقات بيضاء نتيجة تبخر المحتوى المائي للحجارة بسبب ارتفاع درجة الحرارة، مما أدى إلى تشويه مظهرها العام كما يظهر في الجدران الداخلية للمعمودية (الصورة رقم 72).

### I-2-1-5 - التجمّد والذوبان

يُعد التجمّد والذوبان من العوامل الأكثر خطورة على مواد البناء المسامية، خاصة التي تقع في المناطق التي تتعرض لهذا النوع من الظاهرة (التجمّد والذوبان)، ويتجلى فعلها الإتلافي على الحجارة في مساهمتها في تولد شقوق و/أو توسع تلك الموجودة سابقاً، و/أو توسع حجم المسام نتيجة الضغوط المتولد بفعل تجمّد الماء الموجودة داخل هذه الشقوق والمسامات تحت تأثير انخفاض درجة الحرارة إلى ما دون 0°م (درجة تجمد الماء أي درجة الحرارة التي يتحوّل عندها الماء من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة)، الذي يصاحبه زيادة في الحجم

(1)- محمد عبد الهادي محمد، مرجع سابق، ص93.

(2) -Saad Alice, Op cit, p,21.

(3)- الديوان الوطني للأرصاد الجوية بالجزائر بالعاصمة، مرجع سابق.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

بحوالي 9%، ينتج عنها زيادة الضغوط الممارسة على جدران هذه المسام والشقوق، والتي قد تتراوح قوتها من (500 كغ سم<sup>2</sup> إلى 2000 كغ سم<sup>2</sup>) (1).

وبما أنّ تجمّد الماء يبدأ في المناطق القريبة من السطح أولاً ثم يتقدم ويتوسع هذا التجمّد تدريجياً إلى قلب الحجارة كلما انخفضت درجات الحرارة، ويرافق هذا التوسع لجبهة الجليد تولد ضغوط متزايدة قد تفوق مقاومة تحمل الحجارة لتتساقط للشقوق والتفكك والتصدع (2).

وتعتمد حساسية الحجارة للفعل الإلتافي للجليد على طبيعة شبكتها المسامية، ودرجة تشبعها، وعلى مقاومتها الميكانيكية، أما عن تأثير الجليد فيتفاقم فعله مع تزايد شدة وتعاقب وتكرار دورات التجمّد والذوبان، والذي يؤدي إلى انتشار وتوسع الشقوق الموجودة أو توليد شقوق جديدة (3)، والتي بمرور الوقت تتسع ويزداد حجمها فتؤدي إلى حدوث ما يعرف بالتفكك والانفصال وأحياناً انفلاق الحجارة، سنتناول هذا العامل بالتفصيل في الفصلين (4 و5).

وقد اتضح لنا أنّ الموقع الأثري لجميلة مهددٌ من قبل هذا العامل من التلف كون الظروف المناخية السائدة في هذه المنطقة تسمح بحدوث عملية التجمّد والذوبان سواء في فصل الشتاء أو الربيع (الصورة رقم 25)، حيث ينخفض متوسط درجة الدنيا الحرارة إلى (-07م°)، كما يرتفع إلى (+17م°)، وقد يصل إلى (+27م°) في فصل الربيع، ويلاحظ على كثير من الحجارة المشكلة لهياكل مباني الموقع الأثري وجود العديد من مظاهر التلف التي يمكن إرجاعها للجليد.

### I-2-2- عوامل التلف الفيزيو كيميائية

يقصد بعوامل التلف الفيزيو كيميائية تلك العوامل التي تفكك وتحلل العناصر المعدنية المكونة للحجارة مع إحداث تغيير في التركيب المعدني، أو إضافة عناصر معدنية جديدة، ومن أخطر هذه العوامل نذكر:

(1)- Claire Moreau, vieillissement naturel en milieu urbain de pierres calcaires hydrofugées : évaluation de la durabilité des traitements et de leur impact sur le nettoyage, thèse doctorat en Sciences de la Terre, université de Reims Champagne-Ardenne, 2008, France, p9.

(2) -Rana, Ezzedine, Op.cit ,p 14,15

(3) - Claire Moreau, Op cit, p.9



## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### I-2-2-1- الرطوبة

تمثل الرطوبة المحيطة بالمباني الأثرية على اختلاف مصادرها العامل المشترك للعديد من عمليات التآكل الكيميائية والفيزيائية وحتى البيولوجية التي تحدث لمكونات مواد بنائها الحجرية، سواء بتأثيرها المباشر أو غير المباشر، فضلاً عن ذلك، فالفعل السلبي للرطوبة يعتمد على وضعية حالة حفظ المبنى، وطبيعة خواص مواد بنائه الحجرية، ثم شدة الظروف البيئية ونسبة الرطوبة، ومدة التعرض، أما ميكانيكية تلف الحجارة بفعل الرطوبة فهي متعددة، إذ تتسبب الرطوبة المرتفعة في تعديل الخواص الميكانيكية والحرارية للحجارة، ناهيك عن التغيير في الأبعاد بفعل التمدد والتقلص الناتج عن اكتساب وفقدان الحجارة للماء<sup>(1)</sup>، فضلاً عن التلف المرتبط بالأملاح والجليد.

ويمكن القول أن العمليات الرئيسية التي تعزى إلى ارتفاع الرطوبة تعود إلى تورم المعادن الطينية أثناء دورات الترطيب والجفاف، كما أن ظواهر التمدد والتقلص تتطور بشكل كبير في حالة وجود الأملاح القابلة للذوبان، والتي تسهم بشكل كبير في تعزيز الإجهادات الميكانيكية التي تلعب دوراً في تلف الحجارة<sup>(2)</sup>، وتتجلى ظواهر التلف المنسوبة للتغيرات في الرطوبة، في التآكل والتقشر، والتورق، وأنماط مختلفة من التشققات، والتآكل التفاضلي<sup>(3)</sup>، كما تساهم الرطوبة المرتفعة أيضاً في إذابة وتفكيك المواد الرابطة للمكونات المعدنية للحجارة<sup>(4)</sup>، بالإضافة إلى تحفيزها للتفاعلات الكيميائية الضارة بمكونات الحجارة، كتحويل الغازات الحمضية المتواجدة في الهواء لأحماض قادرة على تغيير مكونات الصلبة (كربونات الكالسيوم) الغير قابلة للذوبان في الماء لمكونات هشة (بيكاربونات الكالسيوم) قابلة للذوبان في الماء بسهولة، إلى جانب توفيرها لظروف ملائمة لنمو وتكاثر الكائنات الدقيقة التي يمكنها أن تنتج أحماضاً عضوية تحفز تفكيك وإذابة مكونات الحجارة<sup>(5)</sup>.

(1) -Julien Berger, Contribution à la modélisation hygrothermique des bâtiments, application des méthodes de réduction de modèle , thèse doctorat en génie civil, université de Grenoble, France, 2014, p13.

(2) - Claire Moreau , Op cit, p8.

(3)– Birte Johanna Graue, Stone deterioration and replacement of natural building stones at the Cologne cathédral a contribution to the préservation of cultural héritage, doctoral thesis in geosciences, the Georg-August University, Göttingen, 2013, pp7-8.

(4) – عبد المعز شاهين، مرجع سابق، ص 188.

(5)-Julien Berger ,Op.cit,p21

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

في حين الرطوبة المنخفضة تؤدي إلى إضعاف المواد الرابطة واللاحمة لمكونات الحجارة نتيجة فقدانها لقوة ترابطها وتماسكها وتلاحمها، فتصبح على إثرها متحررةً يسهل تفتتها تحت تأثير كل من الرياح والأمطار<sup>(1)</sup>، وزيادة على ذلك قد يكون فعل الرطوبة ضار بشكل كبير جداً عندما تحتوي الحجارة على أملاح قابلة للذوبان، فتحفر عندئذٍ قابلية ذوبانيتها وتبلورها، وقد تولد ضغوطاً داخليةً عند تبلورها داخل مسامات الحجارة، أو تتساهم في تشكيل طبقات ملحية بيضاء على أسطحها الخارجية مما يشوه مظهرها العام.

وطبقاً لبيانات الديوان الوطني للأرصاد الجوية خلال السنوات العشرة الماضية المقاسة بمنطقة جميلة المبينة في الفصل الأول، والتي يتضح منها أنّ المنطقة تتميز برطوبة نسبية مرتفعة قد تبلغ نسبتها عتبة 85% خاصة في فصل الشتاء والرّبيع، بينما تبلغ أدنى مستوى لها في فصل الصيف في شهر جويلية بـ31%<sup>(2)</sup>، لذا فالموقع عرضة لتأثير هذا العامل، إذ تتفاوت الأضرار بين تشكّل البقع السوداء وتراكم الملوثات وتزهر الأملاح على سطح الحجارة، وتشكل أخاديد في بعض الأجزاء من الحجارة نتيجة انحلال مكوناتها، إلى جانب نمو الطحالب في الأقبية وانتشار النباتات والأشنيات، وغيرها من مظاهر التّلف.

### I-2-2-2- التّساقط

بغض النظر عن شكل التّساقط (الأمطار، الرّذاذ، البرد، الثلوج)، فهو يُعد من أخطر عوامل التّلف المناخية على حجارة المواقع الأثرية، خاصة إذا كانت غنية بالعناصر الضّارة التي يمكن إدخالها إلى مساماتها بالإرتفاع الشّعري أو بالإمتصاص الهيدروسكوبي<sup>(3)</sup>.

وقد أكدت Rana Azzedine<sup>(4)</sup> أنّ الفعل السّلبى للأمطار على الحجارة يعتمد على طبيعة تكوينها المعدني، وعلى شكلها وحجمها، ومدة التّعرض، وعلى سرعة امتصاصها الشّعري (المسامية، وحجم الفراغات، والشّعرية والنفاذية)، وأيضاً على عمق تغلغل المياه في مساماتها، وبقائها محجوزة داخلها قبل تبخرها أو تجردها، إلى جانب دور الرياح من خلال

(1)- سلمان أحمد المحاري، حفظ المباني التاريخية، مرجع سابق، ص114.

(2)- معطيات الديوان الوطني للأرصاد الجوية للجزائر العاصمة للفترة الممتدة من سنة 1996 إلى 2008م

(3) -Wieslaw Domaslawski, Conservation préventive de la Pierre, traduit par Woszyck Irena, UNESCO, Paris,1982,p19

(4)- Rana, Ezzedine, Op.cit ,p10.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

تحكمها في شدة تساقطها وقوة ارتطامها، وفي اتجاهاتها، حيث تكون الأسطح المواجهة للرياح أكثر تعرضاً للأمطار (الصورة رقم 28) وبالتالي للكشط والغسل ولتسرب المياه والإذابة وتبلور الأملاح.

إنّ فعل الأمطار على الحجارة المستخدمة في الآثار يتم بطريقتين، أولاً العمل الميكانيكي الذي يكون أكثر أو أقل إتلافاً اعتماداً على موضع الحجارة في البناء، حيث تكون الأجزاء الأفقية أكثر تأثراً من الأجزاء العمودية، ويكون فعل الأمطار مدمراً إذا كانت غزيرة، كونها قد تشكّل سيول يتولد عنها قوة دفع وضغط كبيرة، قد تتسبب في انهيار كامل للمنشآت الأثرية، أو ميلاناً لأجزائها الضعيفة، أو طمرها بشكل كلي أو جزئي (1).

والشكل الثاني لفعل الإتلافي للأمطار هو العمل الكيميائي، وذلك من خلال مساهمتها في إذابة ونقل وترسيب الأملاح القابلة للذوبان على أسطح الحجارة، وبذلك تكون هي أصل التآكل الناتج عن تبلور الأملاح، ناهيك عن تضاعف خطر الأمطار إذا كانت حمضية نتيجة تحويلها لغازات التلوث الجوي لأحماض تحفز وتسرع عملية تحلل مكونات الحجارة، كما قد تعمل على تهيئة مكونات هذه الحجارة الصلبة لمراحل تكون أكثر قابلية للذوبان في الماء، مما يعزز تفكك ونزوح المكونات والمواد الرابطة للكتل الحجرية وحتى الملاط (2).

وقد اشار Claire Moreau (3) بأنّ الحجارة الجيرية حساسة جداً للإنحلال بفعل الأمطار، حيث يكون معدل التآكل Récession للحجارة في موقع يتعرض لـ 1000 ملم من الأمطار سنوياً في حدود 3 إلى 20 ملم في ألف عام.

زيادة على ذلك، تساقط الثلوج لا يقل دوره عن أشكال التساقطات الأخرى التي تعرفها المنطقة، إلا أنّ دوره في عملية التآكل يظهر من خلال زيادة الثقل على هياكل البناءات، لأنّ سمكه قد يصل إلى 50 سم أو أكثر كما يظهر في الصورة رقم 24، مما يشكل ثقلاً إضافياً على الأجزاء الهشة للجدران.

بالإضافة إلى مساهمته في خفض درجة حرارة مواد البناء، ناهيك عن زيادته لتشبع

(1)- ناصر سعيد الجهوري، مهددات التراث الأثري في سلطنة عمان، جامعة السلطان قابوس، 2010، ص 56، 57.

(2)- عبد المعز شاهين، مرجع سابق، ص 206.

(3)- Claire Moreau, Opcit, p8.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

الحجارة والتي قد تصل إلى مستويات حرجة جداً نتيجة ذوبانه، مما يشكل مصدراً للماء أثناء دورات التجمد والذوبان (الصورة رقم 25)، وهذا ما يعزز ويحفز ويضاعف الفعل الإتلافي للجليد.

كما يلعب التساقط دوراً هاماً في تحفيز التلف البيولوجي بما يوفره من امدادات للمياه التي تشجع نمو الكائنات الحية، وأنواعاً من النباتات على أسطح الحجارة نظراً لوجود بذور النباتات التي نقلتها الرياح أو تواجدت في مخلفات وفضلات الطيور، والتي تتسبب في حدوث أضرار فيزيائية وكيميائية سنتحدث عنها لاحقاً في الجزء الخاص بالفعل البيولوجي.



الصورة رقم 24: تراكم الثلوج على هياكل البناء في الموقع (ديسمبر 2018)  
الصورة رقم 25: ذوبان الثلوج والجليد وتشكيل برك مائية بالموقع ديسمبر 2018

أما بخصوص تأثير هذا العامل على حجارة معالم الموقع الأثري فيظهر جلياً وبشكل ملفت للإنتباه، حيث يلاحظ انتشار كبير للتشققات والتجاويف، والبعض الآخر في حالة تدهور شديدة جداً، إذ بمجرد لمسها تتفتت كمسحوق مثل حجارة التوف (الصورة رقم 64)، كما يلاحظ وجود العديد الجدران الداعمة للتربة مائلة بسبب دفع التربة كما يظهر في الصورة رقم 26 التي تبين ميلان إحدى جدران الحمامات الكبرى القائمة بالتقنية الأفريقية، وأيضاً تهدم بعض الجدران لهذا المعلم كما يظهر في (الصورة رقم 27)، إلى جانب تجمع الأوحال (الصورة رقم 29).



## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة



الصورة رقم 27: توضح تهدم أحد جدران الحمامات الكبرى تحت تأثير مياه الأمطار



الصورة رقم 26: توضح ميلان إحدى جدران الحمامات الكبرى بسبب الأمطار



الصورة رقم 29: توضح تجمع الأوحال بالمدخل الجنوبي للموقع الأثري



الصورة رقم 28: توضح تساقط مياه الأمطار من الجهة الغربية للأعمدة بالكنيسة

### I-2-2-3- المياه تحت السطحية

تعد المياه تحت السطحية مصدراً رئيسياً لانتشار الأملاح والرطوبة الصاعدة من التربة إلى جدران المباني بفعل الخاصية الشعرية لإرتفاعات معينة، مما ينتج عنه إذابة ونزوح المواد الرابطة لمكونات الحجارة المشكلة لهذه الجدران، وهذا ما يجعلها أكثر هشاشة وضعفاً، كما تؤدي إلى زيادة الرطوبة التي تعمل على توفير بيئة مواتية لنمو النباتات والكائنات الدقيقة<sup>(1)</sup>.

(1)- إبراهيم محمد عبد الله، المرجع السابق، ص99.

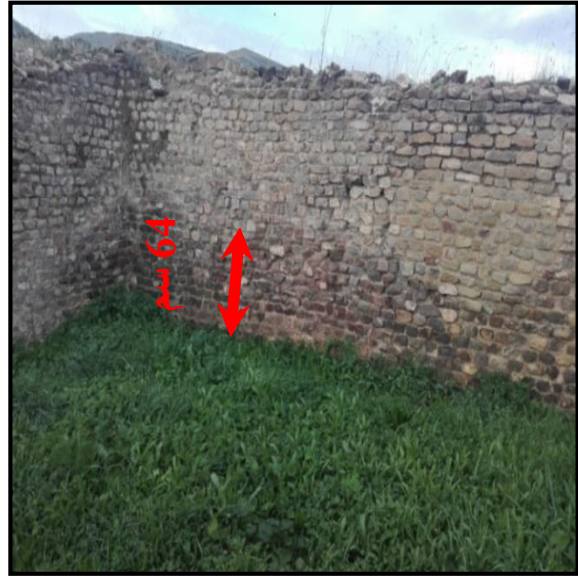
## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

أما بخصوص تأثير المياه تحت السطحية على آثار جميلة فلا يمكن إغفاله، فقد شكلت خطراً كبيراً في الماضي، وقد أشارت العديد من الدراسات إلى أنّ المكان الذي شُيّد عليه قوس كركلا عبارة عن مرجة، وهذا ما أثر على استقرار هذا المعلم، حيث ظهر به تشقق خطير سنة 1887م على مستوى مفتاح القوس، الأمر الذي دفع إلى التفكير في طريقة لإصلاحه والتي كانت بالتدخل المباشر عليه، وذلك في سنة 1922م حيث تضمنت أعمال الترميم التي أُقيمت عليه عملية تفكيكه، ولضمان توازنه واستقراره تم تدعيم الأرضية المقام عليها بإنجاز أسفل قاعدته بلاطة من الخرسانة المسلحة بعمق 3م، ثم أعيد تركيبه على الهيئة الحالية<sup>(1)</sup>.

أما في الوقت الحالي فإن تأثيرها لا يمكن إهماله في ظل التغيرات الجوية، واقامة بعض المعالم كقوس كركلا على أرضية عبارة عن مرجة، واحتواء بعضها أقبية وأحواض وقنوات للمياه مما تشكّل مصدراً للمياه الصاعدة بالشعرية، فعلى سبيل المثال وصل ارتفاع المياه بالشعرية في جدران الحمامات الكبرى لإرتفاع 64 سم (الصور رقم 30)، وكذلك تم تغيير لون الحجارة للأسود على مستوى قاعدة المعبد السيفيري (الصور رقم 31).



الصورة رقم 31: تبين صعود الماء بالخاصية الشعرية في قاعدة جدار للمعبد السيفيري



الصورة رقم 30: تبين صعود الماء بالخاصية الشعرية بجدار الحمامات الكبرى

(1)- Boukhenouf . Arezki, histoire de de l'arc de Caracalla de Djemila,(Préservation et restauration), revue Athar n° 9, université d'Alger, 2009, pp 63,74.



## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### I-2-2-4- الأملح

تحدث التّجوية الملحية لحجارة البناء الطّبيعية إثر عمليات التّبلور والتّرتيب للأملح الموجودة في مسامها، وقد تُستمد هذه الأملح من مصادر خارجية تنتقل عن طريق امتصاص الماء بالشّعيرية أو امتصاص بخار الماء، واعتمادًا على الظروف المناخية وخصائص الحجارة وتركيبية المحلول الملحي تحدث آليات تدهور متفاوتة الخطورة، حيث تؤدي إلى زيادة الضغوط على البنية المسامية، مما ينتج عنها أضرار بالغة الخطورة إذا تجاوزت مقاومتها<sup>(1)</sup>.

ولا شك أنّ الأملح القابلة للذوبان، تعد العامل المسؤول عن جزء كبير من الأضرار التي تصيب الآثار الحجرية من خلال آليات التّبلور والإنحلال، إذ يتميز التّدهور النّاجم عنها بشكل عام بفقدان المادة المترجم بفقدان الكتلة، وانخفاض الحجم الكلي نتيجة التّجوّف والتّقشر والتّفكك والإنفصال<sup>(2)</sup>، وتعتمد آلية التّلف الملحية (Systèmes salins) التي تم رصدها في المعالم الأثرية على خمسة كاتيونات ( $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Ca^{2+}$ )، وخمسة أيونات ( $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $C_2O_5^-$ )<sup>(3)</sup>.

وتظهر الإضطرابات عندما يكون حجم البلورات الملحية الصّلبة المتشكّلة أكبر من الحجم المتاح في المسام، مما يتولد عنه ضغوطاً متزايدة على جدران هذه المسام قد تؤدي في النّهاية إلى تحطيم جدران المسام وبالتالي إضعاف مقاومتها<sup>(4)</sup>، ويطلق على ظاهرة التّبلور التي تحدث داخل المسام بالتّزهر الخفي أو الأملح الخفية، وهي أكثر خطورة لما يصاحبها من ضغوط موضعية قد تنهك وتضعف وتتلف البنية الداخليّة للحجارة<sup>(5)</sup>، في حين التي تحدث على السّطح يطلق عليها بالتّزهر السّطحي أو ترسّبات الأملح أو الطّفح المّلحي\*، تكون أقلّ ضرراً، فتعمل على تشويه واتساح السّطح<sup>(6)</sup>.

(1)– Birte Johanna Graue, Stone deterioration and replacement of natural building stones at the Cologne cathedral A contribution to the preservation of cultural heritage, doctoral thesis geosciences, the Georg August University of Göttingen, Göttingen,2013,p5

(2) -Rana, Ezzedine, Op.cit, pp153,154

(3)– Claire Moreau, Op cit, p9

(4) -Julien Berger,Op.cit , pp19,20.

(5) – إبراهيم محمد عبدالله، مرجع سابق، ص 102 .

\* – أخذ مصطلح الطّفح المّلحي: ICOMOS –ISCS- Illustrated glossary on stone détérioration patterns, english- arabic version, office des publications universités ,Alger 2016,p.48.

(6)– سلمان احمد المحاري، المواقع الأثرية في مملكة البحرين، مرجع سابق، ص 160 إلى 162.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

فضلاً عن ذلك، فالخواص الكيميائية والفيزيائية للأملاح تحدد سلوكها، ولا سيما قابليتها للذوبان، أما علاقة الرطوبة بالأملاح فلكل ملح نسبة رطوبة معينة ليصل إلى نقطة التوازن مع الرطوبة السائدة في الوسط بما يعرف بـ Humidité relative d'équilibre (HRE)، والتي تلعب دوراً في تحديد التآكل المرتبط بالأملاح، فتتبلور الأقل ذوباناً على السطح، بالقرب من مصدر الأملاح، بينما الأكثر ذوباناً تتغلغل في عمق الحجارة، وتكون الأملاح أشدّ ضرراً عندما تكون (HRE) ضمن نطاق تغيّرات الرطوبة النسبية (اليومية أو الموسمية) كبيراً جداً، إذ تمر الأملاح بدورات التبلور والإتحلال، والتي تسبب اختلاف في الضغوط داخل المسام<sup>(1)</sup>.

أما بالنسبة لتأثير الأملاح على مكونات الموقع الأثري لجميلة، فيلاحظ ترسبات للأملاح على هيئة طبقات بيضاء على جدران العمودية من الداخل (الصورة رقم 72)، ويرجع ذلك لتحلل كربونات الكالسيوم التي تدخل في تركيب الحجارة، أما بالنسبة لتأثير الأملاح على المعالم الأخرى فتكاد تكون غير ظاهرة، لكن هذا لا يعني خلو حجارتها من الأملاح وهو ما يشكل خطراً يُوجب أخذ الحيطة، وذلك بالقيام بالتحاليل اللازمة للكشف عنها واستخلاصها بطرق علمية، ويمكن إجمال أهم أنواع الأملاح التي تصيب الحجارة في الجدول رقم 12.

نوع الأملاح	المصدر
كبريتات الصوديوم	الإسمنت، ملاط الإسمنتي، الأجر
كربونات الصوديوم والبوتاسيوم	الإسمنت، ملاط الإسمنتي، بقايا التنظيف الكيميائي
سولفات الصوديوم	الإسمنت، ملاط الإسمنتي، الخرسانة، ماء الغسيل، الطوب
كلوريد الصوديوم (الهاليت)	مياه البحر والرياح، الأملاح الذائبة
كلوريد البوتاسيوم (سيلفيت)	التربة
كبريتات الكالسيوم (الجبس، الأتهيدريت، الباسانيت)	الجبس، الطلاء، والإسمنت، الملاط، والغلاف الجوي SO <sub>2</sub> ، والرياح، والأنشطة البكتيرية (الميكروبيولوجية)
نترات الصوديوم والبوتاسيوم	التربة، الأنشطة البكتيرية (الميكروبيولوجية)
كبريتات المغنيسيوم	الصخور والملاط الغني بالمغنيسيوم القابل للذوبان

الجدول رقم 12: يبين الأنواع الرئيسية للأملاح التي تلعب دوراً في تلف الحجارة<sup>(2)</sup>

(1) - Claire Moreau, Op cit, p9

(2) -Rana, Ezzedine, Op.cit, p138.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### I-2-2-5 - التلوث

يُعد التلوث من العوامل التي تهدد سلامة المباني الأثرية، إذ يتضاعف فعله الإِتلافي عند توفر عوامل مساعدة مثل الرطوبة، درجة الحرارة والرياح، والتي تنشط عملية إذابة الغازات الجوية وسقوطها على المباني في شكل أمطار حمضية، فبالرغم من تأثيره غير الظاهر على مكونات الموقع الأثري، إلا أنه لا يمكن إهمال تأثيره السلبي على مستقبل هذا الموقع الأثري، خاصة وأنه يتواجد بجوار منطقة عمرانية تشهد نشاطات بشرية متنامية (سكنية، تجارية، صناعية، سياحية، زراعية، ...).

ومن أبرز الملوثات التي تشكّل خطراً على سلامة الآثار بشكل عام والموقع الأثري لجميلة بشكل خاص، مخلفات الأكل والشرب التي يتركها الزوار، والتي تؤدي إلى التشويه البصري فضلاً عن انتشار الروائح الكريهة وتجمع الحشرات والبكتيريا<sup>(1)</sup>، بالإضافة إلى النفايات والرّدم التي ترمى، والتي تشوه المظهر العام لمحيط الموقع الأثري، فضلاً عن تلويث الهواء بالغازات المنبعثة من الأنشطة البشرية المختلفة (الصناعية، التجارية، الزراعية، السكنية)، والتي تتحول لاحقاً في وجود الرطوبة لأحماض تكون مسؤولة عن العديد من الأضرار التي تصيب الحجارة، فحسب محمد صبري محسوب<sup>(2)</sup> الزيادة في تلوث الهواء تؤدي إلى تسريع عملية شيخوخة مواد البناء إلى حدّ كبير..

ومن بين الملوثات الغازية التي تشكّل خطراً على مواد البناء الموقع الأثري نذكر:

#### أ- غاز ثاني أكسيد الكربون CO<sub>2</sub>

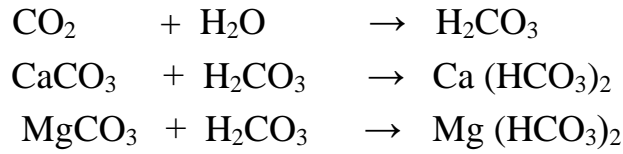
ينتج غاز CO<sub>2</sub> من الحرق الكامل للمواد الكربونية، وعندما يتحد هذا الغاز مع مياه الأمطار يكون حمض الكربونيك الضعيف، وبالرغم من ضعفه إلا أنه قادر على إذابة كربونات الكالسيوم والماغنيزيوم وتحويلها إلى بيكربونات قابلة للذوبان بمائة (100) مرة من كربونات الكالسيوم تاركةً وراءها فراغات تضعف الحجارة، مكونةً بعد ذلك طبقة ملحية هشة من بيكربونات الكالسيوم، والتي تتحول مرة أخرى إلى طبقة صلبة من كربونات الكالسيوم عند

(1) - سلمان احمد المحاري، حفظ المباني التاريخية، مرجع سابق، ص 167.

(2) - Birte Johanna Graue, Opcit, p7.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

تبخر الماء، وهو يندرج ضمن التآلف الكيميائي، ويتم وفق التفاعلات التالية:

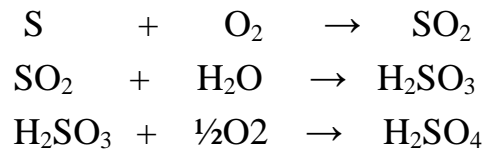


ويتجلى مظاهر تلف غاز ثاني أكسيد الكربون في تكون طبقات ملحية صلبة من كربونات الكالسيوم على أسطح الحجارة مما يؤدي إلى طمس ما تحويه من نقوش وزخارف وكتابات، وقد تؤدي أحياناً إلى فقدان جزء كبير منها خاصة عند القيام بإزالتها.

### ب - غاز ثاني أكسيد الكبريت (SO<sub>2</sub>)

يُعتبر غاز ثاني أكسيد الكبريت من أخطر الغازات الملوثة، إذ تعمل على تآكل أسطح على الآثار الحجرية بطريقة مباشرة أو غير مباشرة، من خلال تفاعل الكبريتة، وقد بين العديد من الباحثين أنّ شدة تلف هذه التفاعلات تعتمد على معدل الكبريتة، الذي يزداد مع زيادة نسبة كل من SO<sub>2</sub> والرطوبة وتقل مع انخفاضهما، وينشأ هذا الغاز بشكل أساسي من عمليات الإحتراق لمركبات الكبريت (1).

كما تتم عملية التآكل أيضاً عن طريق تحلل المواد العضوية المكبرتة (2)، وعندما يتم نقله في الهواء يطلق عليه بالترسب الجاف (3)، وتكمن خطورته في قدرته على التحوّل عند أدنى نسبة من الماء إلى حمض الكبريتوز H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>، والذي بعد أكسدته يتحول لحمض الكبريتيك (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) وفق التفاعلات التالية:



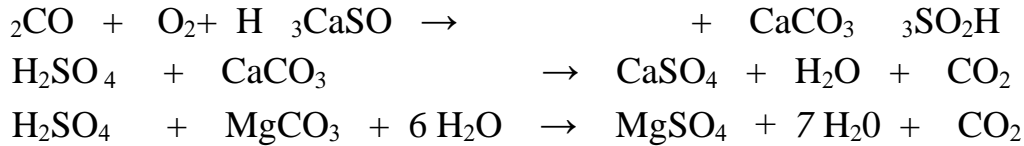
(1) - محمد صبري محسوب، محمد إبراهيم أرياب، الأخطار والكوارث الطبيعية الحدث والمواجهة، معالجة جغرافية، ط1، دار الفكر العربي، 1998، ص175.

(2) - سلمان احمد المحاري، المواقع الأثرية في مملكة البحرين، مرجع سابق، ص 168.

(3) - Claire Moreau, Op cit, p10.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

هذه الأحماض المتشكلة قوية بما يكفي ليكون لها تأثير إتلافي على مكونات الحجارة، خاصةً الرملية والجيرية منها ذات الروابط الكلسية، والتي تتفاعل مع كربونات الكالسيوم أو المغنيزيوم الداخلة في تكوينها لتحويلها لأملاح جيرية قابلة للذوبان، وفق التفاعلات التالية:



هذه المركبات الجديدة عبارة عن أملاح جبسية أكثر قابلية للذوبان من كربونات الكالسيوم، فعلى سبيل المثال كبريتات الكالسيوم ( $\text{CaSO}_3$ ) تذوب بحوالي ثلاثة مرات **بمعدل** (0,045 غ/ل)، في حين كبريتيت الكالسيوم ( $\text{CaSO}_4$ ) يذوب بحوالي 150 مرة **بمعدل** (2,1 غ/ل)، وتتشكل على إثره قشرة ملحية قد تأخذ لوناً رمادياً أو أسوداً لإختلاطها بالملوثات، حيث تزيد في الحجم بحوالي خمسة أضعاف مقارنة بالكالسيت، غير أنها تكون غير صلبة هشة سهلة الإزالة بالأمطار والرياح<sup>(1)</sup>.

فضلاً عن ذلك، فهذه القشرة تنمو على الأسطح المحمية من الأمطار، كما يتم إثرائها بالملوثات من جزئيات الرماد والسّخام والجسيمات التي تحتوي على معادن مثل الحديد والنيكل والتي تساعد في تفاعلات تكوين الجبس<sup>(2)</sup>.

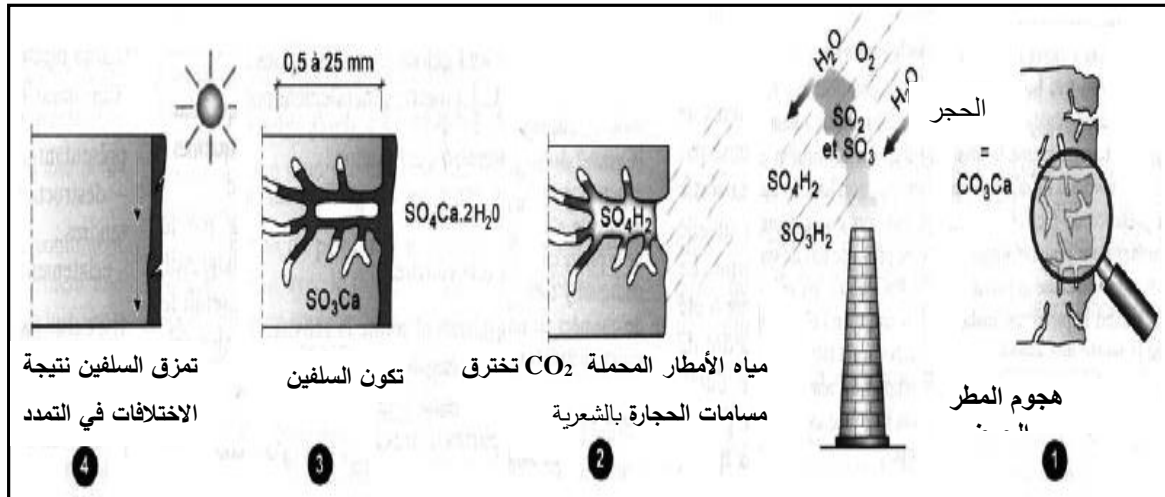
وقد تتشكل قشرة سوداء تسمى "السلفين" «Sulfin» كما هو موضح في الشكل (رقم 12)، والتي يمكن أن يتجاوز سمكها سنتيمترًا أو أكثر، تكون عبارة عن ترسبات أكثر صلابة من 4 إلى 5 مرات من الحجارة، لكن مساميتها ونفاذيتها منخفضة، ويطلق السلفين على حامض الكبريت الذي يهاجم الحجارة، وتكون المنطقة تحت صفائح السلفين قابلة للتفتت، مما يؤدي إلى انفصال تدريجي للقشرة تحت تأثير التغيرات في درجات الحرارة<sup>(3)</sup>.

(1)- سلمان احمد المحاري، المواقع الأثرية في مملكة البحرين مرجع سابق، ص 169.

(2)-Claire Moreau, Op cit, p10.

(3)-Virolleaud François, Le ravalement: guide technique, réglementaire et juridique, Le moniteur,2011 p191, d'après Frédéric magent, Proposition de méthodologie pour la conservation des murs anciens en Maçonnerie de pierre, mémoire d'ingénieur CNAM, construction aménagement, conservatoire national des arts et métiers, Paris, 2013,pp 42-43.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

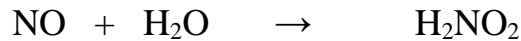


الشكل رقم 12: يوضح طريقة تكوين السلفين على الحجارة الجيرية (1)

### ج - غاز ثاني أكسيد النيتروجين

تتكون أكاسيد النيتروجين ( $NO_x$ ) من اتحاد النيتروجين الناتج عن احتراق الوقود، والأكثر شيوعاً هي أكسيد النيتروز ( $N_2O$ )، وأكسيد النيتريك ( $NO$ )، وثاني أكسيد النيتريك ( $NO_2$ )، بالإضافة إلى أنواع ثانوية أهمها الأمونيا ( $NH_4$ )، كما يمكن أن تنتج من أنواع معينة من البكتيريا المؤكسدة للنيتروجين وأيضاً بواسطة فضلات الطيور والحشرات.

على الرغم من أن أكاسيد النيتروجين تترسب على الحجارة الجيرية في شكل "رواسب جافة"، إلا أن حركتها تلفها بطيئة للغاية وهي أقل تأثيراً من ثاني أكسيد الكبريت، غير أن خطورتها تكمن في قدرتها العالية على الذوبان في الماء لتكوّن أحماضاً قوية كحمض النيتروجين (النيتريك)  $H_2NO_3$ ، وحمض النيتروز ( $H_2NO_2$ )، حسب التفاعلات التالية:



فضلاً عن ذلك، فثاني أكسيد النيتروجين يمكن أن يعمل كمحفز لتفاعل أكسدة ثاني أكسيد الكبريت، أما ميكانيكية تلف هذه الأحماض فهي تعمل على تحويل مكونات الحجارة (كربونات الكالسيوم) الغير قابلة للذوبان في الماء إلى نترات الكالسيوم  $Ca(NO_3)_2$  شديدة الذوبان (2)، ويتم هذا التفاعل كآلاتي:

(1)-Ibid, p43.

(2)-Wieslaw Domasowski, Op.cit, p28



## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة



هذا التفاعل يُعرض سطح الأثر الحجري للتآكل والإختزال بشكل مستمر نتيجة عمليات الغسل بفعل الأمطار، ومع استمرار هذه العملية يفقد الأثر ما يحمله من نقوش وكتابات، وقد يندثر الأثر نهائياً إذا كانت الحجارة المتشكل منها هشة ضعيفة الصلابة.

### I-2-3- عوامل التآكل البيولوجي

يعتبر العامل البيولوجي من أبرز العمليات المسببة لتلف الآثار خاصة عند توفر الظروف المساعدة على ذلك، من رطوبة ودرجة حرارة، وعلى الرغم من أنّ هذا العامل لا يتم دراسته في هذا البحث، إلا أنّ بعض جوانب تأثيره تحتاج إلقاء الضوء عليها، وبشكل عام يكون التآكل البيولوجي أو الحيوي أكثر أو أقل فتكاً بالآثار الحجرية حسب طبيعة ونوعية الحجارة المتشكلة منها، وحالة حفظها، إلى جانب الظروف البيئية التي تقع فيها، أما ميكانيكية تلف هذا العامل فتشمل الإضطرابات البيوفيزيائية والبيوكيميائية التي تسببها أنشطة الحيوانات، والنباتات، فضلاً عن الكائنات الدقيقة التي يمكنها العيش على سطح الحجارة أو في عمقها، نلخص فيما يلي أبرز عوامل التآكل البيولوجي:

### I-2-3-1- الغطاء النباتي

أكدت العديد من الدراسات الحديثة أنّ النباتات على اختلاف أنواعها، سواء كانت أعشاباً أو شجيرات أو أشجار، التي تنمو في شقوق وفواصل المباني الأثرية أو بجوارها تشكّل خطراً كبيراً يهدد استقرارها<sup>(1)</sup>، قد تؤدي إلى تدهور فيزيائي بسبب الضغوط الميكانيكية التي يحدثها نمو جذورها المتوغلة في شقوق الحجارة<sup>(2)</sup>، متسببةً في زيادة حجم تلك الشقوق مما تؤدي إلى فصل الكتل الحجرية لعدة أجزاء.

(1)- ناصر سعيد الجهوري، مهددات التراث الأثري في سلطنة عمان، كلية الآداب والعلوم الإجتماعية، جامعة السلطان قابوس، 2010، ص 258.

(2)- احمد سلمان المحاري، المواقع الأثرية في مملكة البحرين، مرجع سابق، ص 176، 177.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

كما قد تُحدث تلف كيميائي بفعل ما تفرزه من أحماض عضوية تساهم في تحلل الجزيئات الداخلة في تكوين الحجارة والمواد اللائحة لها (1)، كما تعمل النباتات أيضاً على زيادة محتوى CO<sub>2</sub> في الهواء والمياه المتسرب داخل الحجارة، وبالتالي خَفَضَ درجة حموضة تلك المياه (pH)، مما يرفع من قدرتها على الإذابة، فضلاً عن ذلك فإنّ الجذور عند موتها وتحللها تترك وراءها فراغات تكون عبارة عن قنوات داخل الحجارة تساعد على تعزز نقل المياه والمحاليل الكيميائية(2)، بالإضافة إلى ما توفره النباتات من بيئة رطبة تحفز نمو الكائنات الدقيقة (3).

أما في الموقع الأثري فيلاحظ نمو الأشجار والشجيرات بشكل كثيف في أرضية الموقع وفي شقوق والفواصل في الجدران الصورة رقم (32)، والتي أدت إلى تصدع بعض الجدران كما يظهر في الصورة رقم (33)، والتي تشكّل خطراً على سلامة البناء، حيث تتسبب في تدهمه بمرور الزمن إذا لم يتم التخلّص منها نهائياً، فضلاً عن ذلك، قد تتسبب الأعشاب في نشوب حرائق تؤثر بشكل مباشر على سلامة الحجارة بتغيير خواصها الداخلية كالتركيب المعدني، ناهيك عن تشويه مظهرها الخارجي.



الصورة رقم 33: توضح نمو الشجيرات وإحداث شروخ وتصدعات في إحدى جدران الحمامات الكبرى



الصورة رقم 32: تبين نمو بعض النباتات على جدران المعمودية

(1)- نورة عبد التواب السيد، مبادئ الجيومورفولوجيا، مكتبة الأنجلو مصرية، ط1، القاهرة، 2008، ص74.

(2) -Marion Bost, Ahmad Pouya, François Martineau, Effets mécaniques du gel sur l'évolution d'une fissure dans un bloc de calcaire Op.cit, p36

(3) -محمد عبد الهادي، مرجع سابق، ص 93.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### I-2-3-2- الحيوانات

تلعب الكائنات الحيوانية على اختلاف أنواعها دوراً لا يستهان به في تلف مكونات الموقع الأثري، إذ ينتج عنها تلف فيزيائي من خلال الإهتزازات الناتجة عن تنقلاتها، خاصة ذات الوزن الثقيل، ما يعرض الأجزاء الضعيفة منها للتشطيم والانفصال، فضلاً عن تآكل أسطحها نتيجة الإحتكاك، وقد يقدم بعضها إلى حفر جحور أو أنفاق أسفل أساسات المباني وفي الحجارة الهشة، مما يفقدها توازنها واستقرارها، وبذلك يعرضها لخطر التصدع والإنهيار، كما قد تستغل بعض أنواع من الطيور الشقوق والفجوات الموجودة لإقامة أعشاشها، مما يشوه المظهر العام للمعلم الأثري، أما الفعل الكيميائي فينتج بفعل ما تحويه مخلفاتها وفضلاتها من مواد عضوية تهيب الظروف الملائمة لنمو الكائنات الدقيقة كالبكتريا التي يمكنها أن تنتج أحماض عضوية قادرة على مهاجمة مكونات الحجارة والملاط، ناهيك عن بذور النباتات التي تحتويها هذه الفضلات والتي تنمو لاحقاً عند سقوط الأمطار<sup>(1)</sup>.

للأسف، فهذا العامل يمكن ملاحظته بشكل جلي في مباني الموقع الأثري لجميلة حيث تقوم بعض طيور الحمام بإقامة أعشاشها، مما ينتج عنه تراكم لفضلاتها كما يظهر على جدران الحمامات الكبرى (الصورة رقم 34) وغيرها من المعالم.



الصورة رقم 34: مخلفات طيور الحمام على أحد جدران الحمامات الكبرى

(1) - سلمان أحمد المحاري، المواقع الأثرية في مملكة البحرين، مرجع سابق، ص ص 173 إلى 176.



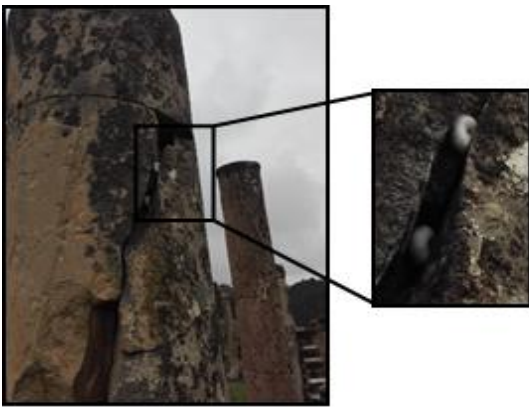
## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### I-2-3-3- الحشرات

يشكل وجود بعض الحشرات تهديداً كبيراً لمكونات الموقع الأثري، ومن بينها النمل الذي يعد من أخطر الحشرات تأثيراً على مواد البناء (الصورة رقم 35)، وتكمن خطورته في كونه يعيش ضمن مستعمرات كبيرة تعمل على حفر أنفاقاً أسفل المباني، مما يؤدي إلى خلخلة التربة وتصدع المباني القائمة فوقها<sup>(1)</sup>، بالإضافة لإفرازه مواداً حمضية تساهم في تحلل مكونات الحجارة، أما النحل البري والدبور فيتمثل خطرهما في عمل بيوت من الطين الملتصقة على المباني الأثرية ما يلوث المظهر العام، بالإضافة إلى خطره على زوار الموقع الأثري خاصة في فصل الصيف (الصورة رقم 36)، بالإضافة إلى انتشار بعض الكائنات الحشرية مثل الديدان البيضاء (الصورة رقم 37).



الصورة رقم 35: تبيين النمل الأسود على مستوى معبد جنيتريكس



الصورة رقم 37: توضح وجود ديدان بيضاء داخل شقوق بأعمدة بالكنيسة القديمة



الصورة رقم 36: توضح وجود خلية الدبور في أحد جدران الحمامات الكبرى

(1) - عبد المعز شاهين، مرجع سابق، ص 179.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### I-2-3-4- الكائنات الدقيقة

يرتبط الضرر الناتج عن الكائنات الدقيقة بالآثار الحجرية دائماً بالظروف البيئية المحيطة بها (درجة الحرارة، الرطوبة النسبية، التعرض لأشعة الشمس)، وعلى نوع الكائنات الدقيقة، وبناء على تأثير هذه الكائنات يمكن تصنيفها إلى فئتين: فئة تشكل رواسب ظاهرة مثل الطحالب والفطريات والأشنات، وفئة لا تظهر إلا بعد انتشار المرض كالبكتيريا، أما تلفها فيمكن إجماله في ثلاثة مظاهر رئيسية (1):

- التأثير الناحية الجمالية: يطلق على هذا النوع من التلف الحيوي بتدهور وظيفي أو التلوث، حيث تقوم كل من الأشنات والطحالب بتشكيل غشاءات على سطح الحجارة، تكون عبارة عن شريط بيولوجي يعمل على تغيير مظهر هذه الحجارة بشكل طبيعي (اللون، خشونة السطح،...) أو تلطخ طبقاتها السفلية بسبب الأصباغ الحيوية؛

- التلف الفيزيوكيميائي: يعتبر آلية تدهور بطيئة جداً، لكنها ذات عواقب وخيمة على المدى الطويل، وتعود التأثيرات المسببة للتآكل نتيجة إفراز الكائنات الدقيقة للأحماض الأيضية القادرة على إذابة مكونات الحجارة الكربونية، بالإضافة إلى الإجهاد الميكانيكي للبنية المعدنية وللنظام المسامي نتيجة التمدد والإنكماش لهذه الكائنات بسبب تشبعها بالماء وجفافها، مما يؤدي إلى إتلاف شبكة المسامية للحجارة، فضلاً عن ذلك، فهذه التعديلات تؤدي إلى تغيير في أنماط تدفق الرطوبة للحجارة وفي درجة استجابتها لدرجات الحرارة، وتحفيز الذوبان الكيميائي؛

- التأثير الأخير وهو ازدياد معدلات تراكم ملوثات الغلاف الجوي: الذي يعود للتأثير المشترك للإستعمار البيولوجي وتلوث الهواء، إذ توجد أنواع من الكائنات الدقيقة تفضل النمو في وجود الملوثات، وفي الوسائط الغنية بـ CO<sub>2</sub>، وفي البيئات التي يكون فيها مستوى NO<sub>2</sub> أو SO<sub>2</sub> أو كلاهما مرتفعاً، فضلاً عن ذلك، فالهواء الملوث الذي يحتوي على مواد عضوية يسرع نمو الأغشية الحيوية، بينما يميل إلى ترسيب ذات الأصل المعدني، وهذا بدوره يساهم في التطور البيولوجي، لأن المنتجات العضوية المترسبة تعتبر مصدراً للطاقة، وفي نفس الوقت مواد مغذية، ومن أهم الكائنات الدقيقة المتسببة في تلف الحجارة نجد:

(1) - Claire Moreau, Op cit ,pp 6-7.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### أ- البكتيريا

تعد البكتيريا أصغر الكائنات الحية النباتية، وهي كائنات وحيدة الخلية متعددة الأشكال منها الكروية والعصوية والحلزونية وهي متعددة التغذية، تكون غالباً مسؤولة عن تحلل التركيب المعدني للحجارة والملاط بفعل الأحماض العضوية التي تنتجها، أو عن طريق أكسدة المركبات المختلفة التي تساهم في تكوين الكبريتات أو النترات، ومن أبرز أنواع البكتيريا نذكر:

- **البكتيريا المؤكسدة للكبريت:** هي بكتيريا لا هوائية «*Desulfovibrio desulfuricans*»، تعيش في التربة قرب المباني، ويتركز نشاطها في المناطق القريبة من السطح مثل «*Thiobacillus thiooxidans*» و«*hiobacillus thioparus*»، حيث يمكنها الانتقال مع الماء المتسرب للحجارة، والتي قد تصل إلى 100 000 بكتيريا في المتر المكعب<sup>(1)</sup>، الأمر المميز أن لهذه البكتيريا لها القدرة على إنتاج حمض الكبريتيك  $H_2SO_4$  الذي عند توفر الرطوبة يتفاعل مع كربونات الكالسيوم ويحولها لكبريتات الكالسيوم الهشة والتي تكون سهلة الإزالة خاصة عند تشبع خلاياها بغاز ثاني أكسيد الكربون  $CO_2$ .

- **بكتيريا الأكتينوميستي *Actinomycetes*:** تعمل على إنتاج أحماض عضوية قادرة على إذابة مكونات الحجارة الكربوناتية، كما تساهم في تغيير لون سطحها<sup>(2)</sup>.

- **بكتيريا النيتروجين أو النيتروباكتيريا:** هي بكتيريا هوائية، يتركز تواجدتها في المناطق القريبة من السطح، ويكمن خطرهما في قدرتها على أكسدة الأمونيا الموجودة في الأمطار والغبار وفضلات الطيور إلى أحماض النيتروز والنتريك، التي تساهم بدورها في تحويل كربونات الكالسيوم إلى نترات الكالسيوم القابلة للذوبان، ومن الأعراض المميزة للنيتروباكتيريا تفكك سطح الحجارة بحيث يصبح مسامي جداً ليتساقط في الأخير كمسحوق أصفر ناعم جداً<sup>(3)</sup>.

- **بكتيريا الحديد:** يعمل هذا النوع من البكتيريا على أكسدة معادن الحديد الموجودة في مواد البناء الحجرية مثل البيريت وعادة ما تأخذ اللون الأحمر<sup>(4)</sup>.

(1)- wieslaw domaslawski , Op.cit, pp43-44.

(2)- سلمان أحمد المحاري، حفظ المباني التاريخية، مرجع سابق، ص138

(3)- wieslaw domaslawski , Op.cit, p46

(4)- سلمان أحمد المحاري، المواقع الأثرية في مملكة البحرين، مرجع سابق، ص183.



## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

-البكتيريا المؤكسدة للسيليكات: هي بكتيريا غيرية التغذية، توجد في الحجارة الكلسية والملاط الجيري، تعمل على إنتاج حمض (2 cétonégluconique) الضار بالحجارة، كما لهذه البكتيريا دوراً في انحلال فوسفات الكالسيوم والسيليكات والألومينوسيليكات التي يصعب حلها (1).

### ب- الأشنات

تُعد الأشنات كائنات نباتية، تمثل تكافل بين الطحالب والفطريات، تكون إما سطحية أو متغلغلة، وهي تفضل النمو والإستقرار على الهياكل الحجرية في مواقع مختلفة في البيئات النقية غير الملوثة، وقد تأخذ ألواناً متعددة من (البرتقالي، الأخضر، الرمادي، البني، الأسود) (2). أما بخصوص تأثيرها فقد تباينت آراء الباحثين، فمنهم من يعتقد أنّ لها تأثير وقائي ضد تدهور سطح الحجارة، لذا يفضل عدم التّخلص منها، خاصة عندما لا يؤثر تطورها بالمبنى الأثري، إذ تعد اثناء لقيمه ومصالحته التاريخية والفنية (3).

في حين فريق آخر يري عكس ذلك، حيث يعتبر هذه الكائنات الدّقيقة من عوامل التّدهور، لذا يجب الحدّ من نموها والتّخلص منها، كونها تتسبب في إتلاف الأسطح التي تحتلها بتغيير مظهرها، إذ تقوم بالهجوم الكيميائي عن طريق المركبات الحمضية التي تنتجها كحمض النّيتريك أو الكبريتيك أو الأكساليك، التي لها القدرة على مهاجمة السّيليكات والميكا وبلاجيوجلاز والكوارتز، وعندما تتفاعل هذه الأحماض مع مكونات الحجارة الكلسية  $CaCO_3$  ينتج عنها تشكيل طبقات سطحية بنية اللون غنية بأوكسالات الكالسيوم (4).

كما يمكنها أنّ تؤثر ميكانيكياً من خلال قوي الضّغط التي تطورها الجذريات المتغلغلة، والتي تؤدي إلى انفصال الأجزاء الهشة للحجارة (5)، كما يؤدي انتفاخها عندما تكون رطبة وتقلصها عند جفافها إلى نفس النتيجة، وغالباً ما يظهر سطح الحجارة ببنية غير مستقرة في شكل ثقب وأحياناً تجاويف، وتؤدي على المدى الطويل إلى تفكك حبيبي سطحي (6)، وعند موتها وانفصالها عن أسطح الحجارة تترك مظاهر تلف مختلفة.

(1)-wieslaw domaslowski , Op.cit, p46.

(2)- Iipid,p68.

(3)- Claire Moreau Op.cit, p7.

(4)- Julien Berger Op.cit, p13.

(5)-إبراهيم محمد عبدا لله، مرجع سابق، ص117.

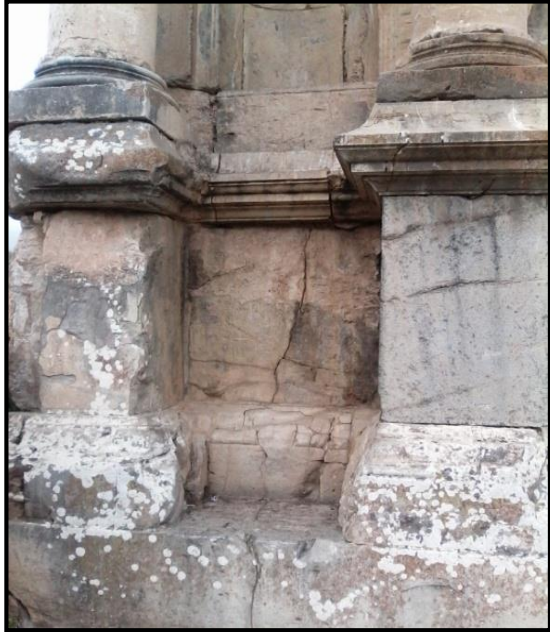
(6)-ICOMOS –ISCS ,Op.cit.p68

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

ومن خلال ملاحظة معالم الموقع الأثري يلاحظ أنّ أغلبها متعرضة للإستعمار الأشني الأبيض كقوس كركلا (الصور رقم 38)، والبرتقالي الملاحظ في كتل حرجية بالحي المسيحي (الصورة رقم 39)، وغيرها من المعالم، كالحمامات الكبرى، والمسرح، معبد العائلة السيفيرية.



الصورة رقم 39: تبين انتشار أشنات برتقالية اللون على كتلة حجرية بالحي المسيحي



الصورة رقم 38: تبين انتشار أشنات بيضاء على قاعدة جدار بقوس كركلا

### ج-الفطريات

الفطريات كائنات نباتية ذاتية التغذية تظهر في شكل بقع على الأسطح لتُكوّن العزّل الفطري ذو الألوان المتعددة (الأخضر، والرّمادي، والبني، والأسود)، وهي تفضل النمو في بيئة تتراوح درجة الحرارة فيها بين 20 و25°م، كما أنّ الفطريات تشارك في عملية التلف الميكروبيولوجي للحجارة الأثرية، حيث ينتج عنها تحولات كيميوفيزيائية ضارة، فالتأثير الفيزيائي يحدث بسبب الضغوط الميكانيكية المتولدة نتيجة نموها، مما يؤدي إلى كشطها للأسطح التي تحتلها، أما الفعل الكيميائي عن طريق إفرازها لأحماض عضوية (كربونية، أو كبريتية، أو آزوتية) التي تتفاعل مع مكونات الحجارة الصلبة لتحوّلها لمركبات هشة<sup>(1)</sup>.

(1)-إبراهيم محمد عبدالله، مرجع سابق، ص115.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### د-الطحالب

تُعد الطحالب كائنات نباتية ذاتية التغذية ثالوسية تفتقر لوجود الأوراق والسيقان والجذور الحقيقية، وهي متعددة الألوان (خضراء، وحمراء، وزرقاء، والبنية)، ويرجع تغيّر لونها إلى مادة الكلوروفيل بالإضافة إلى الصبغات الثانوية الأخرى (1)، تُعتبر المسؤولة الأولى عن البقع الخضراء، والسوداء وحتى الحمراء، وهي تُفضل النمو على الأسطح التي تبقى رطبة لفترات طويلة مع توفر الإضاءة والحرارة (2).

وتشير العديد من الأبحاث بأنّ الطحالب الخضراء يمكنها احتلال مجموعة واسعة من الطبقات التحتية للحجارة، والتي ترتبط بشكل رئيسي بالخصائص الفيزيائية لسطح الحجارة (المسامية، والخشونة، والنفاذية)، وبشكل ثانوي بطبيعة الطبقات التحتية (3).

ويرجع الدور المتلف للطحالب إلى آلية معقدة تنتج عن افرازها لأنواع مختلفة من الأحماض العضوية، من بينها حمض الأوكساليك الذي له القدرة على مهاجمة المركبات الكربوناتيّة لتشكل الأوكزلات، والذي في أغلب الحالات يكون مسؤولاً عن لون المغرة الذي تأخذه الحجارة (4).

كما يمكن أن يكون لها فعل ميكانيكي متلف نتيجة توغل جذورها في طبقات الحجارة، وعند تقلصها تجلب معها الأجزاء الملتصقة بها مؤديةً إلى كشطها وتقشرها وتساقطها مع الزمن (5).

ويمكن ملاحظة انتشار الطحالب في العديد من معالم الموقع الأثري لجميلة وبشكل خاص في الأماكن الرطبة، كما يظهر في أسقف وجدران الحمامات الكبرى (الصورة رقم 40)، وأيضاً في أقبية هذه الحمامات الكبرى (الصورة رقم 41).

(1)- حسين علي السعدي ، نضال إدريس سليمان، علم الطحالب، اليازوري، الأردن، 2006، ص9.

(2)-ICOMOS –ISCS- Illustrated glossary on stone deterioration patterns, English -Arabic version, office des publications universities, Alger 2016,p 66.

(3)-Maria Filomena Macedo and all, (Biodiversity of cyanobacteria and green algae on monuments in the Mediterranean Basin): an overview, Microbiology 155, SGM, Britain, 2009pp 3476–3490.

(4)- Kevin Beck, Op.cit,p23

(5)-Julien Berger, Op.cit, p12.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة



الصورة رقم 41: تبين نمو الطحالب الخضراء في إحدى أقبية الحمامات الكبرى



الصورة رقم 40: تبين نمو الطحالب الخضراء على جدران وأسقف إحدى قاعات الحمامات الكبرى

### I- 4-2- العامل البشري

لا يقتصر تأثير العامل البشري على تشويه وضياع القيم الأثرية والفنية والجمالية التي تحملها الآثار، بل ينتج عنه مشاكل عديدة قد لا يمكن إصلاحها، ويمكن إرجاع أغلبها لقلّة الوعي المجتمعي بأهمية الآثار، و/أو لعدم احترام قواعد الترميم، أو لغياب الصيانة، أو تغيير التوازن في البيئة المحيط بالآثار، كالتلوث وإزالة الحماية، ومن بين أبرز التداخلات السلبية التي تُعرى للعامل البشري نذكر:

#### I- 4-2-1- الحروب

لقد أسهمت كثير من النزاعات الداخلية والحروب في تدمير وتخريب العديد من معالم المواقع الأثرية منذ تأسيسها في الجزائر بشكل عام و الموقع الاثري لجميلة بشكل خاص، ناهيك عن سرقة وتهريب كنوزه خارج البلاد، خاصة في عهد الإستعمار الفرنسي الذي أخذ العديد من الكنوز منها، بعضها محفوظة حالياً في متاحف فرنسا، بالإضافة إلى قيامه بالعديد من الحفريات والترميمات، والتي أضرت كثيراً بمعالمه، والأخطر من ذلك هو ربط تاريخ المنطقة كلياً بالحضارة الرومانية متناسياً بذلك التاريخ العريق للمنطقة قبل التواجد الروماني، والذي يعود إلى آلاف السنين بدليل الآثار التي عثر عليها في المنطقة.



## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### I-2-4-2- الحرائق

تشكل الحرائق أحد أكبر التهديدات التي تواجه الآثار، كون ضررها غير قابل للإصلاح، ناهيك عما تحدثه من تحولات فيزيوكيميائية ضارة بالحجارة المتشكلة منها حيث تفقد صلابتها، فعلى سبيل المثال تتحول الحجارة الجيرية بفعل الحرارة العالية إلى جير حي قليل الصلابة سريع الإزالة بالماء (1) ، بالإضافة إلى الأضرار التي تتجم عن الرماد والغازات المنبعثة كزيادة نسبة CO<sub>2</sub> وغيرها، والتي تؤدي إلى رفع معدلات درجات الحرارة، أو تحوّلها إلى أحماض ترفع من حموضة المياه، والتربة، وحتى مواد البناء (2).

وعموماً يلاحظ مظاهر الحرق في الموقع الأثري في جملة الأمر الذي يدل على تعرض المنطقة إلى حرائق أو إشعال النار كما هو ملاحظ في قبو الحمامات الكبرى (الصورة رقم 42)، ونظراً لكبر مساحة الموقع والإنتشار الكثيف للنباتات، فقد تعرض الموقع لحريق صائفة 2019 (الصورة رقم 43)، لكن لحسن الحظ تم إخماده قبل أن يتسبب في كارثة، لكنه خلف أضراراً على بعض الحجارة، تمثلت في تغيير لونها إلى الأحمر.



الصورة رقم 43: تبين تعرض الموقع الأثري للحرق بالقرب من الحمامات الكبرى جويلية 2019



الصورة رقم 42: تبين مظهر الحرق في الطابق تحت الأرضي للحمامات الكبرى

(1)- عبد المعز شاهين، مرجع سابق ، ص 170.

(2)- محمد صديري محسوب، محمد إبراهيم أرياب، 1998، ص ص185-186.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### I-2-4-3-أعمال الهدم والتخريب والتشويه

لا شك أنّ كثير من التّعدّيات التي تضر بالآثار ترجع لقلّة الوعي لدى المجتمعات المحلية والجهل بالقيم التي تحملها هذه الآثار، خاصة إنّ لم تكن تعود عليها بالفائدة (1).

ويتجلى ذلك من خلال العديد من التّعدّيات والممارسات بقصد أو عن جهل، كظاهرة الهدم التي يقوم بها الأفراد بغرض استخدام مكوناتها في البناءات الجديدة (2)، أو التّعدّيات التي تؤدي إلى التّشويه البصري من خلال القيام بالرّسومات والكتابات لتسجيل الذّكريات أو الأسماء بالطلاء كما يظهر في أحد أقبية الحمامات الكبرى (الصورة رقم 44)، أو القيام بنقش الأسماء أو الحفر كما يظهر في الصّورة (رقم 45)، أو نزع أجزاء منها واخذها كتذكّار، فضلاً عن التّقلّات العشوائية فوق الكتل الحجرية والأرضيات الفسيفسائية غير المحمية التي تؤدي لتآكلها وتفتت ملاطها وانفصال مكعباتها.

بالإضافة إلى قيام بعض الأشخاص بإدخال حيواناتهم إلى الموقع الأثري لغرض الرعي مع بداية دخول فصل الرّبيع ما يشكل خطراً مباشراً على الهياكل من جراء تنقل تلك الحيوانات فضلاً عن الروائح الكريهة المنبعثة من فضلاتها من جهة، مشكلاً منظرًا غير حضاري يشوه جمالية الموقع الأثري، ناهيك عن الكلاب التي ترفقها محدثاً هلع للزوار.

بالإضافة إلى قيام بعض الزوّار بتصرفات غير أخلاقية خاصة في الأماكن المنعزلة كالإستبراء وقضاء الحاجة التي تتسبب انتشار الروائح الكريهة، وهذا ما لاحظناه في العديد من النّقاط المعزولة والمخفية عن الأنظار كالحمامات الكبرى، المعبد السّيفيري، الكابتول، وغيرها من المعالم.

(1)- عزت زكي حامد قادوس ، مرجع سابق، ص 248.

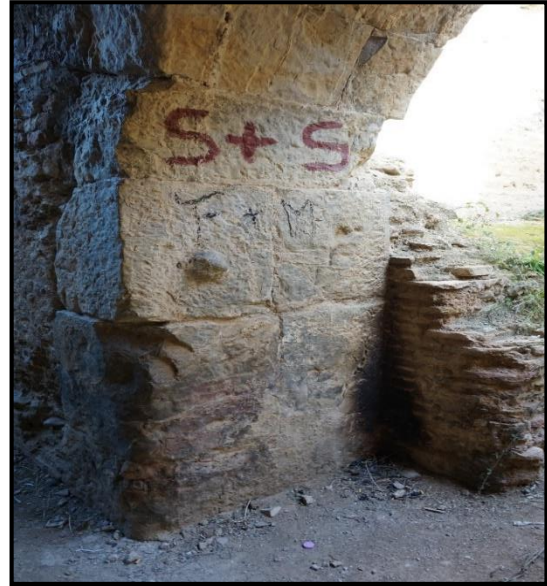
(2)- ناصر سعيد الجهوري، مهددات التراث الأثري في سلطنة عمان، 2010، ص 249.



## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة



الصورة رقم 45: تبين تعدي الزوار بالحفر والنقش على أحد الجدران بالحمامات الكبرى



الصورة رقم 44: تبين تعدي الزوار بالكتابة في أقبية الحمامات الكبرى

### I-4-4-2- تأثير النشاط السياحي

بالرغم من أهمية السياحة الأثرية في التنمية المحلية، إلا أنها تشكّل مصدراً للعديد من الأخطار التي تؤدي لاستنزاف الثروة الأثرية خاصة في ظل غياب الوعي الأثري<sup>(1)</sup>، فعلى سبيل المثال الإزدحام الشديد على معالم الموقع الأثري كقوس كركلا، المعبد السيفيري، المسرح وغيرها يؤدي إلى تآكل أسطح حجارته نتيجة الاحتكاك الميكانيكي الذي يضعف مقاومتها.

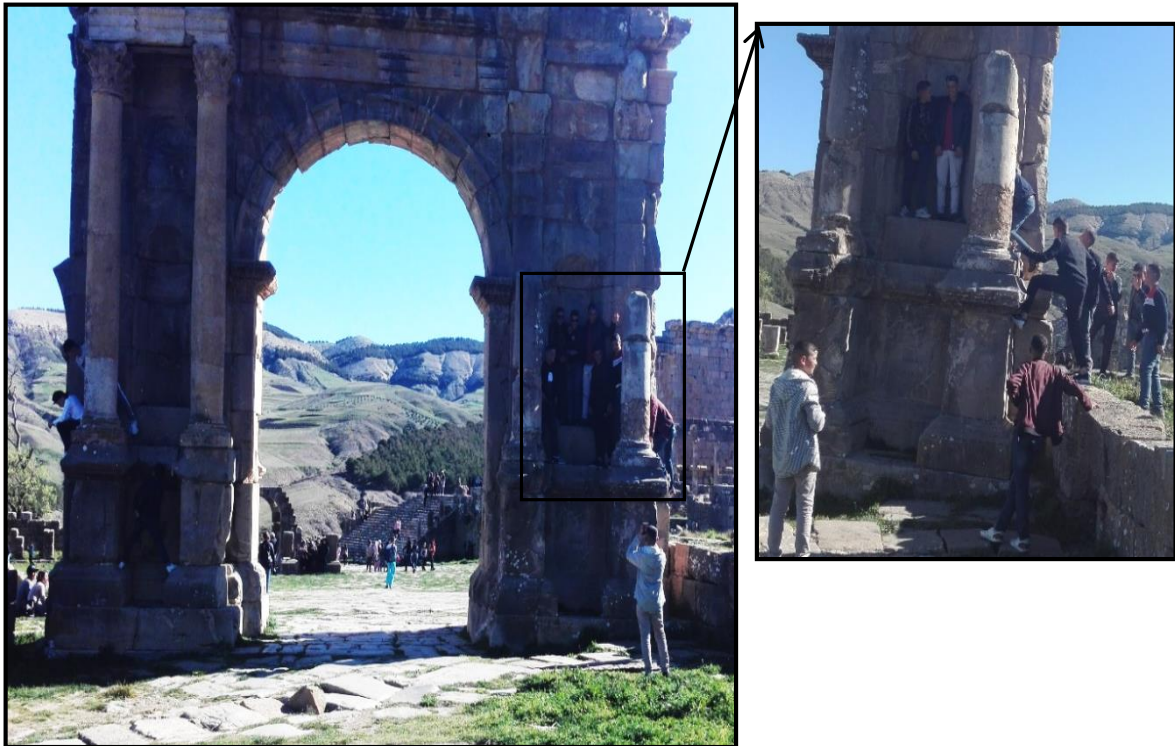
كما قد تكون مصدراً للتلوث، كانبعاث الغازات الملوثة الناتجة عن وسائل النقل، أو الروائح الكريهة الناتجة عن تعفن مخلفات الأكل والشرب، والتي تصبح مصدراً لجلب مختلف الحشرات والبكتيريا، بالإضافة إلى السلوكيات السلبية والغير المسؤولة لبعض الزوار الناتجة عن عدم وعيهم بأهمية هذه الآثار كتسلقها بغية أخذ صور تذكارية، مما يؤدي إلى تحطيم أجزاء منها أحياناً، وهذا ما لاحظناه في الموقع الأثري بقيام بعض الزوار، خاصة الشباب والأطفال، بتسلق بعض المعالم لأخذ صور تذكارية، كالمسرح (الصورة رقم 64)، وقوس كركلا كما يظهر في الصورة رقم (47).

(1)-سلمان أحمد المحاري، المواقع الأثرية في مملكة البحرين، مرجع سابق، ص 196.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة



الصورة رقم 46: تبين صعود الزوار على الكتل الحجرية على مستوى المسرح



الصورة رقم 47: تبين صعود الزوار على هيكل قوس كركلا

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### I-2-4-5- الترميمات الخاطئة

يندرج تحت الأخطار البشرية ما يقع فيه المرممون من أخطاء نتيجة قلة الخبرة والدراية الكافية بأساليب الترميم الصحيحة والمواد الملائمة للأثار، قد تؤثر بشكل سلبي يؤدي إلى فقدان الأثار لقيمتها، أو قد تحدث تغييراً جوهرياً في المظهر العام مما يعطي قراءات خاطئة، أو قد تشوه الأثر نهائياً<sup>(1)</sup>.

ومن خلال المعاينة الميدانية للعديد من معالم الموقع الأثري لجميلة، يلاحظ وجود مظاهر تلف مختلفة ومتعددة الخطورة، والتي يرجع أغلبها إلى أخطاء في الترميمات التي أقيمت عليها، فوفق التقارير الخاصة بالموقع، يتبين أنّ الحفريات التي أجريت على الموقع الأثري منذ إكتشافه صاحبها ترميمات تضمنت أعمال تفكيك وإعادة التغيرات والإستكمال وإقامة الأنقاض، والتي كان هدفها استرجاع الشكل القديم للموقع.

لكن للأسف هذه التدخلات جلبت نوعاً من التغيرات السلبية، على اعتبار أنّ التصميم الأولي كان غائباً فتم ترميمها بالإرتباط بالتراث الروماني دون مراعات خصوصية كويكول، مما نتج عنه العديد من المظاهر السلبية، فقد لوحظ في العديد من المعالم والأنقاض المقامة وجود عناصر معمارية وكتل حجرية ليس في موضعها، مما أعطي قراءةً مغلوطة.

ناهيك عن تشويه المظهر العام للمعلم، وهذا يدل على أنّ الهدف الرئيسي كان تركيب الحجارة فقط، فضلاً عن الإتلاف وتحطيم العناصر المعمارية واختفاء العديد من العناصر الأثرية أثناء عملية التفكيك وإعادة التغيرات، فعلى سبيل المثال، قوس كركلا الذي تم تفكيكه وأعيد تركيبه واستبدال بعض الحجارة المتدهورة، لكن عند التدقيق فيه يتبين وجود بعض الإختلافات بين عناصره المعمارية وفي كتله الحجرية.

كما يلاحظ أيضاً على مستوى الكابيتول إعادة إنجاز القوس بدون احترام وضعية حجارة مفتاح القوس، الأمر الذي حتمّ تدعيم القوس بإنجاز جدار في مركز القوس لحمله كما يظهر في الصورة (رقم 48)، لكن هذا التدعيم ترك لمدة طويلة دون أنّ يتم إتمام القوس

(1) – Hartwig Schmidt, La reconstruction de bâtiments anciens, Actes de conference international sur La conservation des sites archeologiques dans la region mediterraneenne, l'institut de conservation Getty, Etats-Unis D'amerique 1997, p45.



## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

مما أصبح وكأنه جزء من المعلم حيث في حالة نزعه يسقط القوس، وأيضاً على مستوى بازيليكا جوليا يلاحظ تركيب الكتل الحجرية بطريقة عشوائية دون أي تناسق وتجانس (الصورة رقم 49) الأمر الذي شوه واجهة المعلم.

كما يلاحظ كذلك، استخدام مواد بغرض الترميم والتدعيم، لكنها غير متوافقة مع المادة الأصلية للمعلم الأثري، وهي بذلك تعد مصدراً للتلف، فقد استخدمت مادة الإسمنت في سدّ شقوق الجدران والأعمدة وربطها بالأسلاك المعدنية كما يظهر في أعمدة بيت الأسقف بالحي المسيحي (الصورة رقم 50).، بالرغم من أنّ الملاط الأصلي هو الجير، إلى جانب استخدام قضبان حديدية لتدعيم العناصر المعمارية المهتدة بالسقوط، والتي مع الوقت تأكّدت وأدت إلى ظهور الصدأ الذي شوه المظهر العام للمعالم الأثرية، وأيضاً أعطت قراءة تاريخية خاطئة كما يظهر في قمة الجدار الفاصل بين الكابيتول وسوق الإخوة كوزينوس (الصور رقم 51).



الصورة رقم 48: تبين عيوب التّدخلات الخاطئة على مستوى الكابيتول (غياب حجارة مفتاح القوس وإنجاز جدار لدعم القوس)

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة



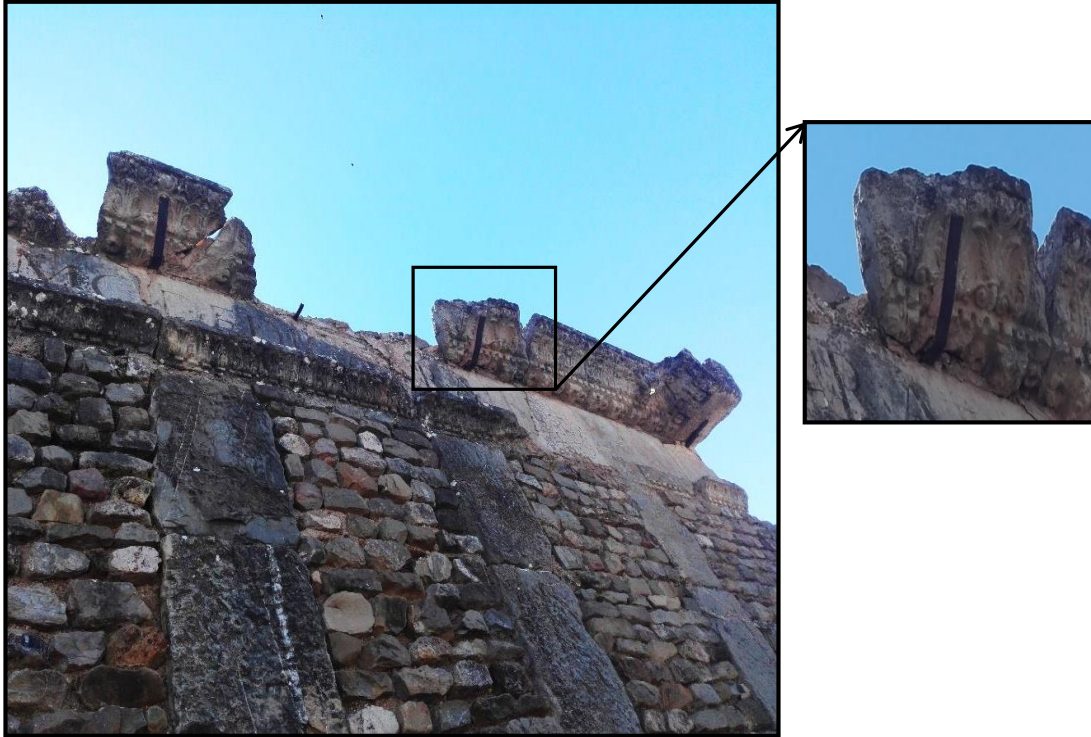
الصورة رقم 49: تبين تركيب الكتل الحجرية بطريقة عشوائية في الجدار الشرقي على مستوى بازيليك جوليا



الصورة رقم 50: توضح استخدام الإسمنت والأسلاك المعدنية في ترميم وتدعيم عمود متواجد بمبنى بيت الأسقف والكاهن (المخطط رقم 1)



## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة



الصورة رقم 51: توضح استخدام الإسمنت والقضبان المعدنية على مستوى الجدار الفاصل بين الكابيتول وسوق الإخوة كوزينوس

### I-6-4-2-1- مشكلة توافق المواد

من الصّعب السّيطرة على المشاكل التي تنتج من عدم التّوافق بين المواد، سواء بين الحجارة نفسها، أو بين الحجارة والمّلاط، فعلى سبيل المثال عدم توافق خصائص نقل الماء بين الحجارة كأنّ تمتلك إحداها إرتفاع الشّعيرية أسرع من الأخرى، ما ينتج عنه تراكم المحاليل في الحجارة الأكثر شعيرية، ونفس المشكل يحدث في حالة عدم التّوافق بين الحجارة والملاط وبذلك يشكّل الملاط حاجزاً كاتماً أو خزاناً محتملاً للمياه المحملة بالأملاح، والتي تعمل على تدهور املاط الفواصل أولاً ثم يتقدم التّدهور نحو طبقات الحجارة إلى أنّ يصل إلى مركزها، مما يكون له فعل إتلافي لهذه الحجارة<sup>(1)</sup>، كما يظهر في الصّورة (رقم 52).

بالإضافة إلى ذلك، وجود أجزاء معدنية قابلة للأكسدة، (المراسي، ومسامير التثبيت، الدّبابيس، القضبان الحديدية)، قد تكون جزء من البناء أو مضافة أثناء عمليات التّرميم، حيث تسبب تدهوراً غير مباشراً للحجارة نتيجة التّورمات المرتبطة بتطوير منتجات

(1)-Mélanie Denecker, Op.cit , p37.



## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

التآكل في ظل وجود الرطوبة، بحيث تمارس ضغطاً على الحجارة المجاورة لهذه العناصر المعدنية، والتي غالباً ما تكون مسؤولة عن الشقوق والشروخ (1).



الصورة رقم 52: التشوه البصري مع ظهور تشققات على مستوى النافورة المخروطية

### I-7-4-2- عيوب التنفيذ (اتجاه توضع الكتل الحجرية)

لا شك أنّ طريقة تركيب الكتل الحجرية في البناء تؤثر بشكل كبير على جودة خواصها الفيزيوميكانيكية، ولضمان ذلك يجب احترام اتجاه طبقاتها (litage) التي من المفترض أن تكون متعامدة مع اتجاه الأحمال الواقعة عليها وذلك للحصول على أقصى مقاومة ممكنة، وعلى النقيض من ذلك، تنخفض المقاومة الميكانيكية للحجارة لأدنى مستوى لها إذا كانت هذه الطبقات موازية للأحمال، وفي نفس الصدد يشير Mélanie Denecker (2) إلى أنّ اتجاه الطبقات يحفز انتقال السوائل بالخاصية الشعرية، مما يعزز عمليات الإنحلال والتفكك والتآكل بفعل الأملاح والجليد، ويتضح هذا جلياً في أغلب هياكل مباني هذا الموقع الأثري كما يظهر في المداميك السفلى للمعبد السيفيري ( الصور رقم 53) مما تسبب في وتشققها وتصدعها، وبهذا شكلت نقاط ضعف تهدد استقرار المعلم ككل وغيره من معالم هذا الموقع الأثري.

(1)-wieslaw domasowski ,Op.cit ,p.40

(2)-Mélanie Denecker, Op.cit,p37.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة



الصورة رقم 53: توضح تدهور الحجارة بشكل عمودي للأحمال للمداميك السفلى على مستوى مدخل المعبد السيفيري (الجهة الشمالية)

### II - أهم أشكال ومظاهر التآكل

كشفت الزيارات الميدانية للموقع الأثري لجميلة عن العديد من العيوب والتدهورات التي مسّت الحجارة المشكلة لمباني هذا الموقع، منها ما هي سطحية، ومنها ما تتعدى لتقيس بنيتها الداخلية، ومن أهم مظاهر التآكل المكتملة الهيئة المنتشرة في الموقع الأثري نذكر:

#### II-1- التآكل وتشكيل الأخاديد

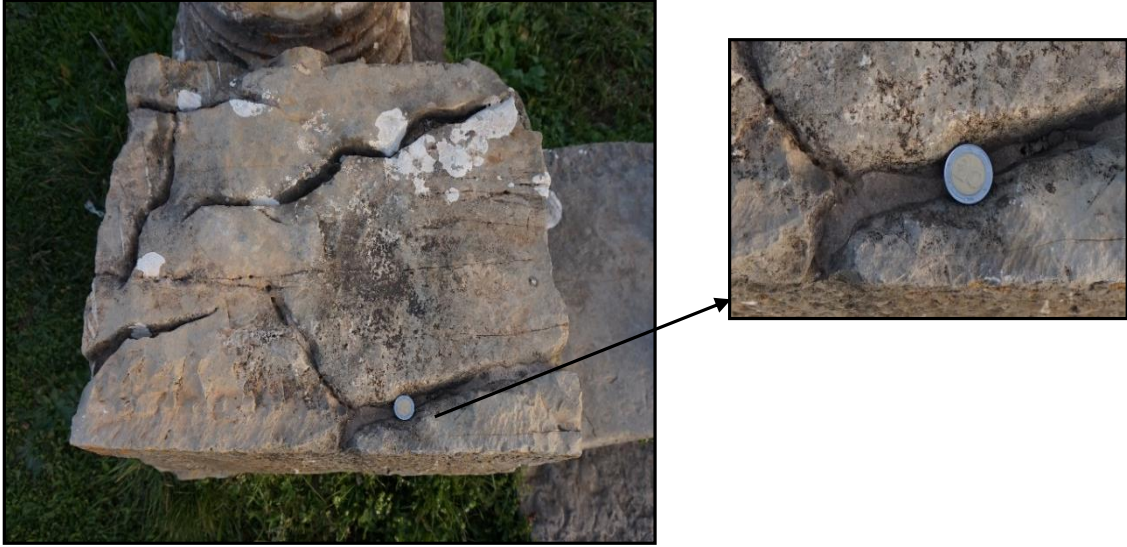
من أبرز المشاكل التي تعاني منها حجارة الموقع تشكّل الأخاديد على الكتل الحجرية والعناصر المعمارية، نتيجة لتآكل وتحلل الطبقات الهشة لأسطح الحجارة (1)، ويعود ذلك أيضاً إلى التأثير المشترك للتآكل الكيميائي والميكانيكي الناتج عن تدفق مياه الأمطار الحمضية، أما حجم وعمق هذه الأخاديد فيعتمد على كثافة الهجوم الكيميائي، وكمية المياه المتدفقة على سطح الحجارة ودرجة صلابة هذه الحجارة (2).

(1)- Kevin Beck, Op cit ,p12.

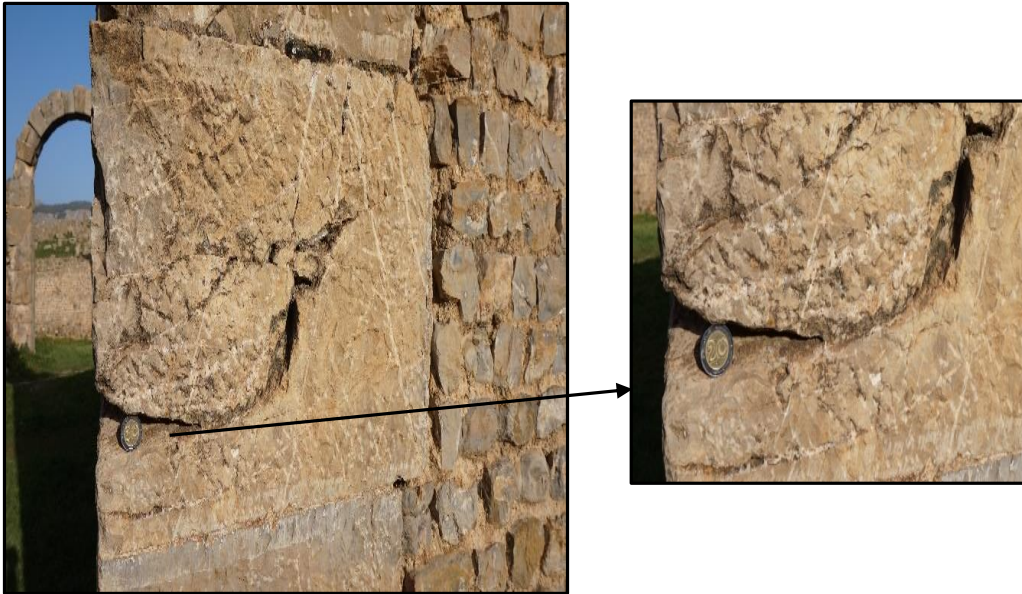
(2)- Claire Moreau, Op cit, p

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

تأخذ التّجاويف اشكال متعددة، قد تكون شكل أفقي كما يظهر في الكتل الحجرية المنتشرة بالحي المسيحي (الصورة رقم 54) من جراء الإتحلال، وقد تكون بشكل عمودي كما يظهر في إحدى أكتاف الأبواب بالحمامات الكبرى (الصور رقم 55).



الصورة رقم 54: تبين أخاديد على كتلة حجرية مصقولة بالحي المسيحي



الصورة رقم 55: تبين تشكّل أخاديد على الحجارة على مستوى الجدار بالحمامات الكبرى

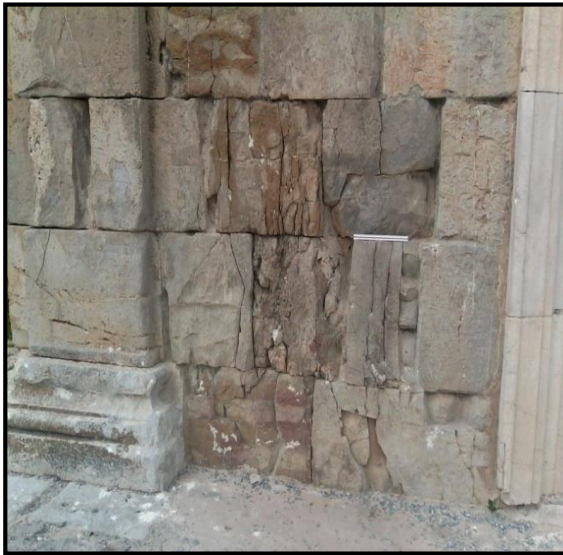


## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

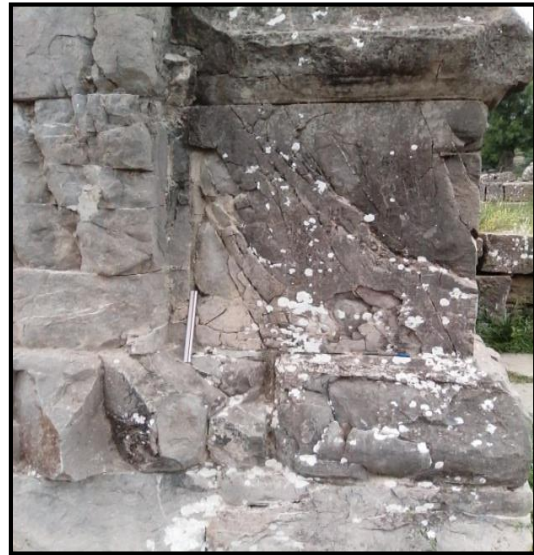
### II-2- الشقوق والشروخ والتصدعات

تُعد الشقوق من المظاهر الأكثر انتشارًا على الحجارة، قد تكون سطحية دقيقة على شكل خيوط شبكة العنكبوت، أو عميقة وعمودية قد تخترق كامل جسم الحجارة<sup>(1)</sup>، ويرجع تشكّل الشقوق لعدة عوامل، أبرزها التباين في خواص الحجارة الميكانيكية والحرارية والهيدروليكية، إلى جانب تأثير الظروف المناخية وعلى رأسها (الحرارة والجليد).

وتكمن خطورة هذه الشقوق في إمكانية توسعها، مما يؤدي إلى تصدع و/أو انفصال أجزاء الحجارة بشكل كلي أو جزئي، ويختلف سمك الشق وعمقه حسب نوع الحجارة، واتجاه طبقاتها، وشدة ومدة التعرض لعامل التلف، كما قد تأخذ أشكالاً متعددة، قد تكون عبارة عن مجموعة من الشروخ تتطور بشكل شعاعي تعرف الشق أو الصدع النجمي\* (صدع على شكل نجمة)، وهو صدع شعري يكون عرضه أقل من 0,1 ملليمتر، ويلاحظ في الموقع الأثري تشققات بشكل مائل في قاعدة قوس كركلا (الصور رقم 56)، وفي المداميك السفلى للمعبد السيفيري (الصور رقم 57)، وفي الكتل الحجرية على مستوى جدران بالحمامات الكبرى (الصور رقم 58)، وتشقق وتصدع الواجهة الشمالية لبازيليك المدينة القديمة القرن IV (الصور رقم 59).



الصورة رقم 57: تبين تشقق حجارة على المداميك السفلى لجدار المعبد السيفيري

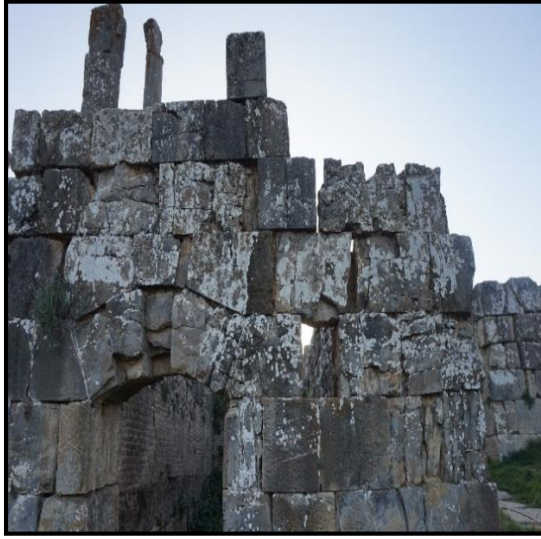


الصورة رقم 56: تشقق وتشرخ حجارة قاعدة قوس كركلا بشكل مائل 45°

1- بلعيبود بدر الدين، دراسة فعالية تقوية الحجارة الأثرية، أطروحة دكتوراه، جامعة الجزائر 2، 2013، ص18.

\*-أخذ مصطلح الصدع النجمي Fissuration en étoile : p10 ICOMOS –ISCS .

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة



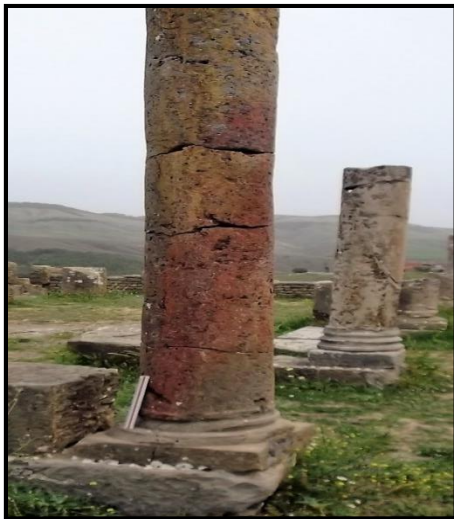
الصورة رقم 59: تبين تشقق الكتل الحجرية على مستوى جدران البازيليكا المدنية القرن IVم



الصورة رقم 58: تبين تشقق وتشرخ الكتل الحجرية لجدار بالحمامات الكبرى

### 3-II- الإنفصام

يتمثل الإنفصام\* في انكسار الحجارة وفق مواطن الضعف، مثل أماكن الشقوق والصدوع الجزئية والشروخ، فعلى سبيل المثال قد ينفصل العمود إلى عدة أجزاء على مستوى الطبقات الترسبية للحجارة، كما يظهر في الصورة رقم 60، وهو ينتج بفعل الظروف المناخية القاسية من درجة حرارة مرتفعة وبرودة شديدة.



الصورة رقم 60: تبين انفصام في أعمدة بشكل أفقي إلى عدة أجزاء على مستوى بازيليك كروسكنيوس بالحي المسيحي

\*-أخذ مصطلح الانفصام Clivage من : ICOMOS –ISCS, p10



## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### II-4- الانفصال

هي عملية انفصال لأجزاء من سطح الحجارة في صورة صفائح أو طبقات بشكل مُستقل عن الطبقات الستراتيغرافية للحجارة، وبشكل موازي لسطح الجدار، وهي ذات سمك متغير، فضلاً عن ذلك، يحدث هذا التدهور نتيجة الإنفلاق بفعل الجليد أو التمدد المائي، أو بفعل تبلور الأملاح، إذ تتطور الشقوق على سطح الحجارة وتتشكل صفائح تنفصل وتسقط بفعل الجاذبية (1).

وحسب Alexandre Caussarieu يحدث الانفصال غالباً بفعل الإجهاد الميكانيكي الناتج عن زيادة الأحمال على هيكل البناء، كما يمكن أن تتسبب دورات التجمد والذوبان في التفتك التدريجي إذ توفر في طبقات الحجارة ممراً للماء، والتي بفعل الجليد تتوسع تلك الممرات مؤديتاً في الأخير إلى انفصال أجزاء من الحجارة (2).

وقد تم تشخيص هذا التدهور في حجارة الموقع الأثري على شكل صفائح ، خاصة في المناطق الرطبة التي تخضع مباشرة لدورات الترطيب والتجفيف، وأيضاً في المناطق التي تتعرض لتسرب مياه الأمطار والثلوج، كما هو موضح في الصورة (رقم 61).



الصورة رقم 61: تبين ظاهرة الانفصال المتوازي للحجارة في جدار بالحمامات الكبرى

(1) -Kévin BECK, Op.cit,p p18,19,20.

(2) -Alexandre Caussarieu ,Thomas Gaumart ,guide pratique de la rénovation de façades Pierre, béton, brique, Groupe Eyrolles,2005 Op.cit,p7.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### II - 5- التّجزؤ

التّجزؤ\* هو انقسام أو تكسر الكتل الحجرية بشكل كلي أو جزئي لقطع مختلفة الشكل والسّمك والحجم، وترتبط شدّة هذا التّجزؤ بدرجة صلابة الحجارة، وطبيعة عامل التّلف وشدّته، ويظهر هذا التّدهور بشكل كبير عند تعرض الكتل الحجرية لأحمال أو أثقال زائدة على الأجزاء العلوية والسّفلية سواء في الجدران أو الأعمدة التي تتكون من كتلة واحدة، والتي تكون معرضة بشكل خاص للإتساق والتّجزؤ، وهذا ما لاحظنا انتشاره في أغلب حجارة معالم هذا المّوقع الأثري ومن أبرزها التّشقق والتّجزؤ بالمرشح (الصّورة رقم 62)، وقوس كركلا (الصّور رقم 63).



الصّورة رقم 62: تبين تشظي الكتل الحجرية على مستوى جدار بالمرشح  
الصّورة رقم 63: تبين تشظي الكتل الحجرية على مستوى قاعدة قوس كركلا

### II - 6- التّجوف

يعد التّجوف السّنخي أو النّخروبي\* الذي يتشكّل على سطح الحجارة نوعاً من التّجوية الطّبيعية التي تحدث نتيجة عدم تجانس خصائصها البيّوفيزيائية والبيّوكيميائية من جهة، ومن جهة أخرى نتيجة التّأثير المّشترك للتّحلل الكيّمائي والعمل الميكانيكي<sup>(1)</sup>، والذي يؤدي إلى التّآكل التّدرجي لطبقات الحجارة مشكلاً بذلك ثقباً أو تجاويف على شكل قنوات متعددة الأشكال والأحجام والإتجاهات، أما حجمها وعمقها فيعتمد على كثافة ومدة الهّجوم

\*-أخذ مصطلح التّجزؤ: ICOMOS -ISCS, p28: fragmentation

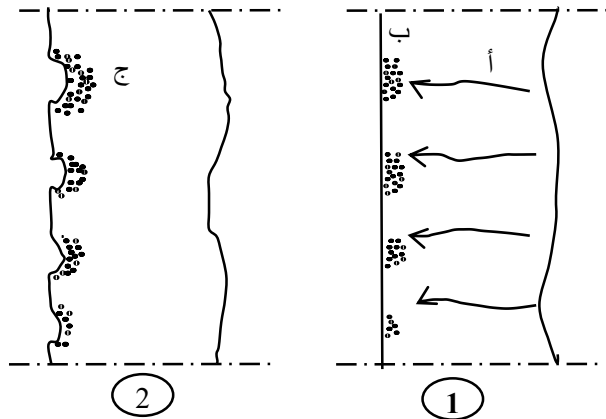
\*- أخذ مصطلح التّجوف السّنخي أو النّخروبي Alvéolisation من: ICOMOS -ISCS, p28

(1) -Claire Moreau, Op cit,p4.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

الكيميائي، ودرجة صلابة أسطح الحجارة، إذ يمكن أن يبلغ سمك الطبقات المتدهورة بضعة ميكرومات إلى عدة مليمترات وأحياناً قد تتعدى السنتمترات<sup>(1)</sup>، فضلاً عن ذلك، قد تحدث هذه الظاهرة بشكل متكرر للأسطح المعرضة للرياح و/أو التبخر، مما يؤدي إلى تسارع الأضرار الناتجة عن التبلور، بحيث يصبح التجويف عميقاً جداً (الشكل رقم 13).

ويظهر هذا التلف في العديد من حجارة جميلة خاصة من نوع الثوف الكهفي، ويتجلى ذلك في جدران المعمودية والحمامات الكبرى (الصور رقم 64).



1-بداية المرحلة:

أ-هجرة المياه بالشعرية، ب: بداية تجمع الاملاح وتبلورها

2-المرحلة الثانية:

ج-تدهور سطح الجدار وبداية تشكل التجاويف

الشكل رقم 13: تمثيل بياني لعملية التجويف<sup>(2)</sup>

### II--7 الثقوب والنقور

تعد الثقوب والنقور\* من مظاهر التلف التي تصيب الحجارة، فالثقوب عبارة عن فراغات ذات أشكال وأحجام مختلفة، قد تكون سطحية أو متغلغلة حسب عامل التلف، وقد تكون ناتجة عن الفعل البشري نتيجة استعمال أدوات حادة (الصورة رقم 65)، أو ناتجة عن النشاط الحيواني، أو الكائنات الدقيقة، أو الرياح (الصورة رقم 66)، أما التنقر عبارة عن فجوات تشبه النقاط ذات حجم صغير (بضعة ميليمترات أو أقل)، شكلها أسطواني أو مخروطي، وهي غير مترابطة مع بعضها، وعادة تكون أصغر من الثقوب، وهي تنتج بفعل ميكروبيولوجي.

(1) – Virolleaud François, Op.cit ,p45.

(2) -Ibid, p45.



## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة



الصورة رقم 65: تبين ثقب ناتجة بفعل بشري الصورة رقم 66: تبين تشكّل ثقب في إحدى الحجارة على مستوى الحي المسيحي على أحد جدران الحمامات الكبرى

### 7-II - التورق

التورق\* هو عملية انفصال الأسطح الخارجية للحجارة في هيئة طبقات رقيقة شبه متوازية مع سطح الحجارة (الصور رقم 67)، ويمكن لتلك الطبقات أن تتحني أو تلتف بشكل متتالي مثل صفحات الكتاب، وتكون ذات أحجام مختلفة حسب درجة صلابة الحجارة (الصور رقم 68)، ويرجع التورق إلى التباين في معدلات التمدد والتقلص للمعادن المكونة للطبقات السطحية للحجارة.

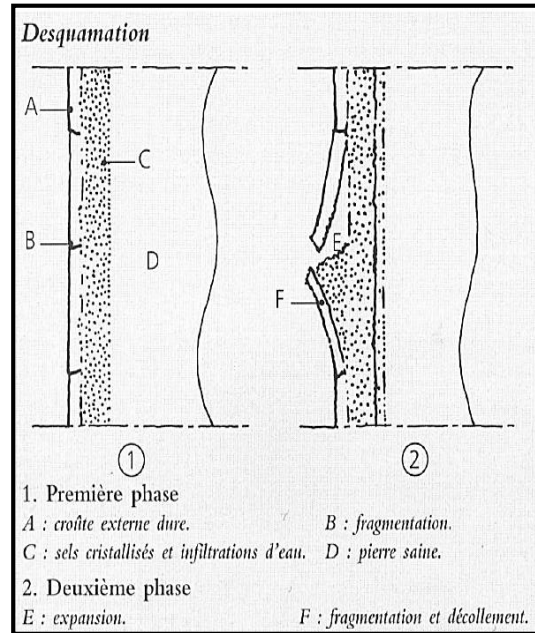
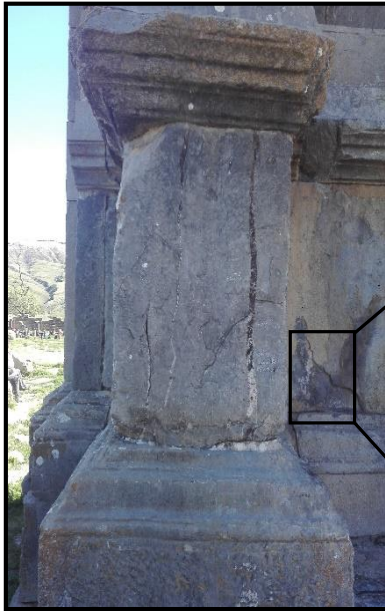


الصورة رقم 67: تبين انفصال سطح الحجارة الكلسية على شكل أوراق على مستوى جدار معبد العائلة السيفيرية  
الصورة رقم 68: تبين انفصال سطح لكتلة حجرية على شكل أوراق على مستوى الحي المسيحي (مبنى 38)

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### II-9-التقشر

التقشر هو ظاهرة يتم خلالها انفصال سطح الحجارة على شكل قشور لا تتبع بنية الحجارة كما في الشكل (رقم 14)، وترتبط هذه الظاهرة بوجه عام بوجود الأملاح، ولكن في بعض الأحيان قد تكون لأسباب أكثر تعقيداً<sup>(1)</sup>، وقد أرجعت العديد الدراسات التي أجريت على هذا النوع من التدهور إلى تواجد كميات كبيرة من كبريتات الجبس التي تعود للعمل الميكروبي، حيث تتواجد طبقة تحت القشور ذات سمك يتراوح بين 2 و 7 سم من السطح ونسبة من كبريتات الكالسيوم تتراوح بين 0 و 50%<sup>(2)</sup>، فضلاً عن ذلك، يكون التقشر أكثر انتشاراً أسفل المباني وفي الأماكن التي تحتفظ بالماء، كما يظهر في قاعدة قوس كركلا الشمالية الصورة (رقم 69).



الصورة رقم 69: تبين تقشر الحجارة الكلسية على

مستوى قاعدة قوس كركلا الشمالية الغربية

الشكل رقم 14: تمثيل بياني لعملية التقشر (3)

### II-10- تغيير اللون والترسبات

يقصد به ذلك التدهور الذي يغيّر من اللون الأصلي للحجارة، قد يكون سطحياً أو متغلغلاً في العمق، وقد يكون نتيجة التغير في التركيب الكيميائي أو المعدني، أو نتيجة العوامل الخارجية كالتلوث والرطوبة، ومن أبرز مظاهر التغير اللوني للحجارة نذكر:

(1) - Virolleaud François , Opcit p44.

(2)- Rana, Ezzedine, Op.cit,p 16.

(3)- Virolleaud François,Op.cit,p 44.

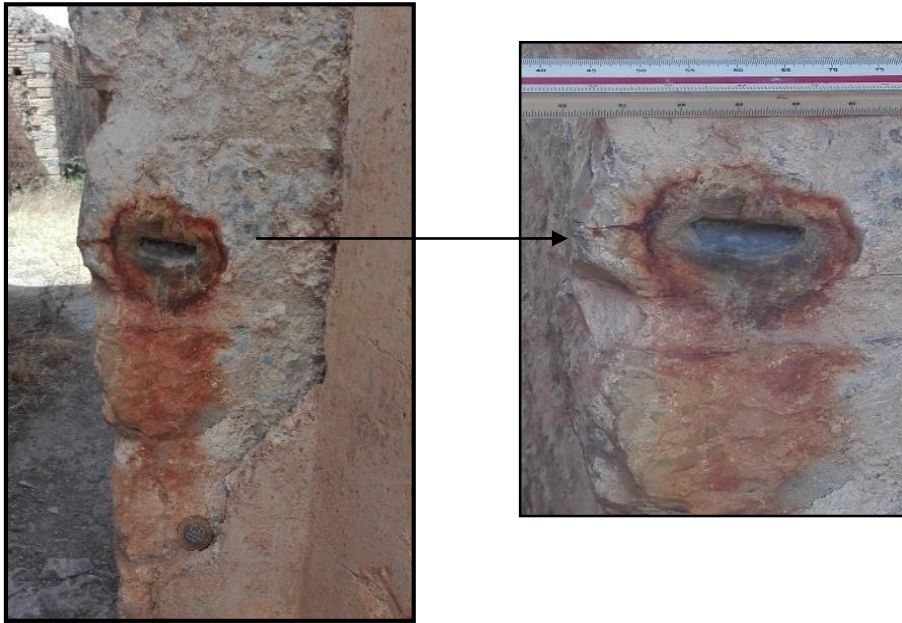
\*-أخذ مصطلح التورق Exfoliation من : ICOMOS –ISCS, p18



## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### أ- التَّبَعُ

يمكن تمييز هذا النوع من التَّلَفِ بسهولة عن طريق تغيير اللَّوْنِ، وهو يحدث نتيجة صدأ المعادن الحديدية التي تَوْدِي إلى تَبَعٍ بُنِي\*، وقد يكون هذا التَّبَعُ من أصل بيولوجي ينتج عن فعل الكائنات الدَّقِيقة من نوع الفطريات المجهرية التي تغزو سطح الحجارة، أو أصل معدني في حالة حبيبات البيريت أو أكسيد الحديد التي تشكِّل لون المغرة أو خطوط الحمراء<sup>(1)</sup>. ويلاحظ تبقع بلون المُغرة على الحجارة بالحمامات الكبرى (الصور رقم 70).



الصورة رقم 70: تبين تبقع نتيجة صدأ المكونات المعدنية على جدار بالحمامات الكبرى

### ب- الطَّفْحُ الملحي

يطلق على الأملاح المترسبة على سطح الحجارة بالطَّفْحِ الملحي\*، والتي تبدو للعين المجردة كترسبات غير متماسكة بشكل جيد، وعادة ما تكون بيضاء اللَّوْنِ على شكل مسحوق (بودرة) أو خطوط طولية، وقد تظهر أيضاً في شكِّل بقع بيضاء، ينتج هذا المَرَضُ أساساً من تبخر التكوينات المألحة التي تظهر على المواد المسامية، وغالباً ما يؤثر على الأجزاء السفلية من الجدران، وتختلف مورفولوجية هذه القشور الملحية حسب طبيعة الحجارة ونوع

\* أخذ مصطلح التَّبَعُ Tache، من : ICOMOS –ISCS, 46p

(1) -Alexandre caussarieu ,Op.cit,p6.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

الأملاح، ويلاحظ انتشار هذا النوع من التّلف على الحجارة الكلسية من نوع التّوف الكهفي والأجر في الأسقف والجدران الداخليّة للمعمودية لإرتفاع يصل إلى 1,60 م (الصورة رقم 71).



الصورة رقم 71: طفح ملحي على حجارة التّوف الكهفي في السقف والجدران الداخليّة للمعمودية

### ج- تدهور الباتينة

تعرف الباتينة على أنها الطبقة السطحية التي تكون في تفاعل مباشر مع البيئة الخارجية، حيث تتعرض لمختلف التغيرات في البنية الكيميائية والمعدنية ضمن ما يعرف بالتقادم الزمني، وهذا بدوره يُعد شكلاً من أشكال التدهور الذي تخضع له الحجارة، وغالباً ما يكون لون الحجارة القديمة أكثر قتامة أو أغمق قريباً من المغرة، أما السطح فيكون ذو ملمس حريري، مما يعطي له مظهراً ناعماً مقارنة مع تلك المستخرجة حديثاً، كما يعتمد سمك ولون وتركيب الباتينة على طبيعة الحجارة وعمرها وعلى الظروف البيئية المحيطة بها<sup>(1)</sup>، كما قد تشكّل الباتينة طبقة واقية تحمي الحجارة وتحد من إمكانية تعرضها للتلف، وقد يشكل هذا

(1) -Kévin BECK, Op.cit ,p15.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

التَّغْيِيرُ في تَرَكيبَة وهيكَل السَّطْح شكل من عدم التَّجانس، إذ يُعد في حد ذاته مؤشِّر على بداية التَّدهور.

ولقد تبين لنا من خلال الزَّيَّارة الميدانية للموقع الأثري أنَّ أغلب حجارتِه وقعت لها تغيَّرات في طبقاتها السَّطحية والتي أصبحت ألوانها بين القاتمة والبَاهتة، إذ يمكن تمييزها بوضوح في العديد من المعالم، من بينها معبد العائلة السَّيفيرية التي تظهر تدهور باتينة كتله الحجرية كما يظهر في الصَّورة رقم (72).



الصَّورة رقم 72: تبين تدهور الباتينة للحجارة على مستوى جدار معبد العائلة السَّيفيرية

### ب- التَّلوث الأخضر

التَّلوث هو تأثير بصري يصيب سطح المواد، وعادة ما يرتبط بترسُّب الجسيمات التي تعلق بالهواء، لكنه يتوافق مع تطور الكائنات الدَّقيقة<sup>(1)</sup>، وعليه فتسمية التَّلوث الأخضر تتضمن جميع أنواع التَّلوث ذو المنشأ البيولوجي كالحزازيات والأشنات، والفطريات والطحالب، وغيرها، هذا التَّلوث ليس دائماً أخضراً، بل يمكن أن يأخذ ألواناً متعددة اعتماداً على طبيعة الكائنات الدَّقيقة، والتي قد تكون خضراء تميل للسواد مثل عائلة الأشنات<sup>(2)</sup>.

(1) -Claire Moreau, Op.cit, p6.

(2) - Ibid,p7.

\*- أخذ مصطلح الطفح الملحي (Efflorescence) من ICOMOS –ISCS, p48



## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

هذا النوع من التآكل يلاحظ بشكل كبير في أقبية وأسقف كل من الكابيتول والحمامات الكبرى (الصورة رقم 73).



الصورة رقم 73: تلوث جدران وأسقف على مستوى الحمامات الكبرى باللون الأخضر نتيجة نمو الطحالب

### هـ-القشور السوداء

تمثل القشور السوداء أبرز التغيرات الأكثر انتشاراً على جميع أنواع الحجارة خاصة المتواجدة في المناطق الحضرية، إذ يمكن أن يصل سمكها إلى عدة سنتيمترات (1)، وهي تفضل التطور في الأجزاء الرطبة المحمية من الجريان السطحي لمياه الأمطار (الجوانب الداخلية من الأفاريز والشرفات، وفي الأجزاء الغائرة).

أما مورفولوجياتها فتختلف وفقاً لخشونة السطح الذي تتطور عليه، فضلاً عن ذلك، تتكون القشور السوداء عادةً من الجبس  $\text{CASO}_4,2\text{H}_2\text{O}$ ، ومن جسيمات ذات أشكال وأبعاد متعددة، والتي تمنحها اللون الأسود لأن الجبس معدن شفاف، أما تشكلها فيتم نتيجة

(1) - Claire Moreau , Ibid,p15.

## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

تراكم الجزيئات الدقيقة من غبار وسخام، والقطران وحبوب اللقاح، وغازات التلوث الجوي من  $CO_2$  و  $SO_2$ ، وغيرها، والتي في وجود الرطوبة تتبلل وتتفاعل مع مركبات الكالسيوم، حيث تعمل هذه البلورات الدقيقة للجبس (الأملاح الجبسية) على تقوية وسمنتة الجزيئات المختلفة<sup>(1)</sup>، وقد تكون هذه القشور هشة وسميكة وعلى طبقات، كما قد تنفصل من تلقاء نفسها جالبة معها أجزاء من سطح الحجارة، أو تتساقط على شكل مسحوق، وبذلك يتعرض سطح جديد لدورة جديدة من التلف.

ويمكن ملاحظة ترسب الجسيمات المحمولة بالهواء، وتشكل القشور على سطح الحجارة بالموقع الأثري بدءاً من ترسبات على السطح ذات اللون الأسود الرمادي والزنجار والملوثات، إلى القشور السوداء الرقيقة والقشور السوداء التي تشبه التوت أو القرنبيط Chou-fleur، في أجزاء كاملة من هيكل المباني، كقوس كركلا (الصور رقم 74)، والمعبد السيفيري، والكابيتول، والأنصاب التذكارية (الصور رقم 75) وغيرها من المعالم.



الصورة رقم 75: تبين تشكّل قشور سوداء على نصب تذكاري بحديقة الموقع الأثري



الصورة رقم 74: توضح ظاهرة تشكّل بقع سوداء على مستوى قوس كركلا

(1) -Claire Moreau, Op.cit, p5.



## الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة

### الخلاصة

نستخلص مما سبق أنّ الحجارة المشكلة لهياكل مباني الموقع الأثري لجميلة تتعرض لعوامل تلف مختلفة، قد تعمل منفردة أو مجتمعة في إحكام دورة التآلف الفيزيائية و/أو الكيميائية، والتي أوصلت حالة حفظها للوضعية الزاهنة، فضلاً عن ذلك، فطبيعة وشدة الأضرار تعتمد بشكل خاص على جودة الخواص الجوهرية للحجارة (التركيب المعدني، المسامية والنفاذية، نسبة الإمتصاص، التّشبع، المقاومة الميكانيكية)، بالإضافة إلى طبيعة عامل التآلف وشدته ومدته، حيث تعمل بعض العوامل كمقدمة لمراحل تلف أخرى، أو تكون عاملاً محفزاً ومنتشطاً لعامل تلف آخر، فعلى سبيل المثال الرطوبة تعد عامل مشترك لمختلف عمليات التآلف، إذ تعمل على زيادة المحتوى المائي للحجارة للدرجة الحرجة، وبهذا تكون الحجارة في أقصى ضعفها، وعند انخفاض درجة الحرارة لأدنى من 0°م تتجمد تلك المياه ويزداد حجمها مما تولد ضغوطاً داخلية متزايدة تتسبب قد تضعف وتتلف البنية الداخلية لهذه الحجارة إذا تجاوزت مقاومتها، وعليه نستخلص أن عملية التآلف هي حلقات متسلسلة لا يمكن فصل عامل عن الآخر، فضعف العوامل الداخلية يهيئ الحجارة لتتعرض بشكل أسرع للعوامل الخارجية، لذا من المهم دراسة تأثير هذا العامل (الجليد) على ديمومة ومتانة الحجارة، فالتساؤل الذي يتم طرحه كيف يؤثر الجليد على ديمومة الحجارة؟

## الفصل الرابع:

# آليات تأثير الجليد على الحجارة

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

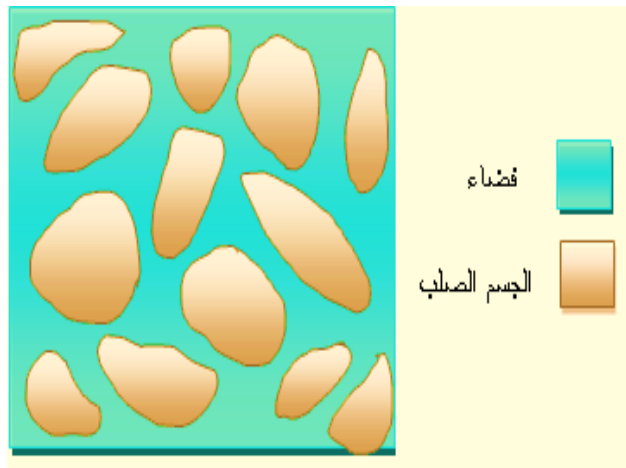
تعاني الآثار الحجرية المكشوفة في المواقع الأثرية خاصةً الغير المحمية منها في المناطق التي تشهد انخفاض شديد في درجات الحرارة من أضرار شديدة الخطورة ناجمة عن تجمد وذوبان المحتوى المائي لمواد بنائها الحجرية، وفي سياق ذلك سنحاول في هذا الفصل إلقاء الضوء على آليات تلف الجليد على الحجارة، والأضرار المترتبة عنها.

### I- عموميات حول الوسط المسامي للحجارة

لا شك أن طبيعة الوسط المسامي للحجارة تلعب دوراً أساسياً في تعزيز تلفها، لأنه يتم على مستواه العديد من آليات التلف المرتبطة بالماء خاصةً عند انخفاض درجات الحرارة أو ارتفاعها، إذ يحدث تجمد وذوبان الماء الشاغل لهذا الوسط المسامي، مما يؤدي إلى تغييرات في الخواص الفيزيوميكانكية للحجارة والتي تؤثر على صلابتها، ولمعرفة سلوك الحجارة اتجاه الجليد إرتئينا إلى تقديم بعض المفاهيم العامة عن الوسط المسامي والمسامية.

#### I-1- المسامية والوسط المسامي

يعرف الوسط المسامي بأنه عبارة عن تراص لعناصر صلبة تتخللها فراغات كما هو موضح في الشكل (رقم 15)، إذ يتخذ هذا الوسط شكل شبكة مستمرة ومعقدة مكونة من مسام مختلفة الأبعاد والأحجام، قد تكون منعزلة أو متصلة مع بعضها بواسطة قنوات<sup>(1)</sup>، ويستخدم عادة عند التحدث عن فضاء المسام عدة مصطلحات أبرزها مسام صغيرة، مسام متوسطة، مسام كبيرة<sup>(2)</sup>.



الشكل رقم 15: تمثيل بياني للوسط المسامي (جسم صلب وفضاء المسام)

(1)-Kevin Beck, Op.cit. p72.

(2)-Jean-François Daïan, Equilibre et transferts en milieux poreux première partie - états d'équilibre, France, 2010, p11.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

### I-1-1 مفهوم المسامية

تعرف مسامية مادة بأنها النسبة المئوية بين حجم الفراغات الموجودة على الحجم الكلي لهذه المادة<sup>(1)</sup>، وتختلف قيمها طبقاً لحجم وشكل الحبيبات المكونة لها، ودرجة تداخلها وتراسها مع بعضها البعض بما يسمى بالنمو المتداخل<sup>(2)</sup>، حيث تبلغ أدنى مستوى لها في كل من الحجارة النارية والمتحولة، بينما أعلى قيم لها تكون في الحجارة الرسوبية، نظراً لإحتفاظ حبيباتها بأشكالها الكروية أو شبه الكروية، بما يسمح بتكوين فراغات مختلفة الحجم والشكل، كما قد تحتوي هذه الحجارة الرسوبية على مكونات لها القابلية للذوبان في الماء، مما ينتج عنها تشكيل تجاويف تساهم بدورها في رفع مساميتها، كما قد تحتوي الحجارة على عروق وشقوق تزيد من مساميتها.

### I-2-1 تصنيفات المسامية

تلعب طبيعة الوسط المسامي للحجارة دوراً هاماً في تحديد شكل المسامية السائدة، فضلاً عن تحكمها في خواص نقل السوائل وتخزينها، وبالتالي في درجة تشبعها، وللتمييز بين أصناف المسامية المختلفة فقد تم تصنيفها وفق عدد من المعايير من أهمها نذكر<sup>(3)</sup>:

#### I-2-1-1 التصنيف على أساس حجم المسام

في هذا التصنيف تقسم المسامية لثلاثة فئات:

- مسامية دقيقة: يكون قطر المسام أقل من 1 ميكرون؛
- مسامية متوسطة: يتراوح قطر المسام من 1 إلى 10 ميكرون؛
- مسامية كبيرة: يكون قطر المسام أكبر من 10 ميكرون.

#### I-2-2-1-I تصنيف المسامية طبقاً لإرتباطها بعملية الترسيب

وفق هذا المعيار تقسم المسامية إلى نوعين رئيسيين:

#### أ- مسامية مرتبطة بالترسيب الأولي

يتوافق تشكّل هذا النوع من المسامية مع عملية التكوين الأولي للحجارة، والتي ينتج

(1)-Charlotte walbert, Op.cit,p9

(2)- إبراهيم محمد عبدالله، مرجع سابق، ص ص 77،78.

(3)-Charlotte walbert, Op.cit p10.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

عنها أصناف مختلفة من المسامية يمكن إجمالها في ثلاثة فئات:

- مسامية بين الحبيبات: تمثل الفراغات الموجودة بين مختلف مكونات الحجارة، تكون في أغلب الأحيان غير مفتوحة بمعنى (مغلقة)؛
- مسامية داخل الحبيبات: تمثل المسامية الدقيقة، وهي تقع داخل الجزيئات المكونة للحجارة؛
- مسامية بين البلورات: موجودة أساساً في حجارة الدولوميت.

### ب- مسامية مستقلة عن عملية الترسيب الأولي

تعتبر هذه النوعية من المسامية بمثابة مسامية مكتسبة خلال عملية الذوبان أو التشققات التي تصيب الحجارة، ومن أبرزها مسامية الشقوق التي تشكل بصورة أو بأخرى وسطاً غير مستمر يقطع جانس الحجارة، كما يمكن أن تكون على شكل تجايف وفراغات نتيجة انحلال مكونات الحجارة القابلة للذوبان<sup>(1)</sup>، فضلاً عن ذلك، قد تكون هذه التشققات والتجايف مقراً لحركة نقل وتخزين الماء فضلاً عن المحاليل، مما يجعلها من الأماكن المفضلة للفعل الإتلافي للعديد من عوامل التلف، في مقدمتها الأملاح والجليد.

### I-1-2-3- تصنيف المسامية على أساس اتصال المسام فيما بينها

يضم هذا النوع من المسامية ثلاثة أنواع:

- مسامية مغلقة: تمثل الفضاء المسامي المعزول تماماً عن شبكة المسامية الأخرى<sup>(2)</sup>، وهي عبارة عن مسامات غير متصلة فيما بينها، مما يترتب عنه عدم وجود أي إمكانية لدخول السوائل للحجارة حتى تحت الضغط<sup>(3)</sup>.

- مسامية مفتوحة أو حرة: وهي عكس المسامية المغلقة، تتشكل من مسامات تتصل فيما بينها على الأقل باتصال واحد مع بقية شبكة المسام<sup>(4)</sup>، وهي بذلك تسمح للحجارة بالتشبع وتجديد السوائل عند جفافها.

(1)-Tourenq Claude , la gélimité des roches application aux granulats, rapport de recherche n° 6, ministre de l'équipement et du logement, France, 1970, pp 8-9.

(2) - Charlotte Walbert Op.cit ,p10.

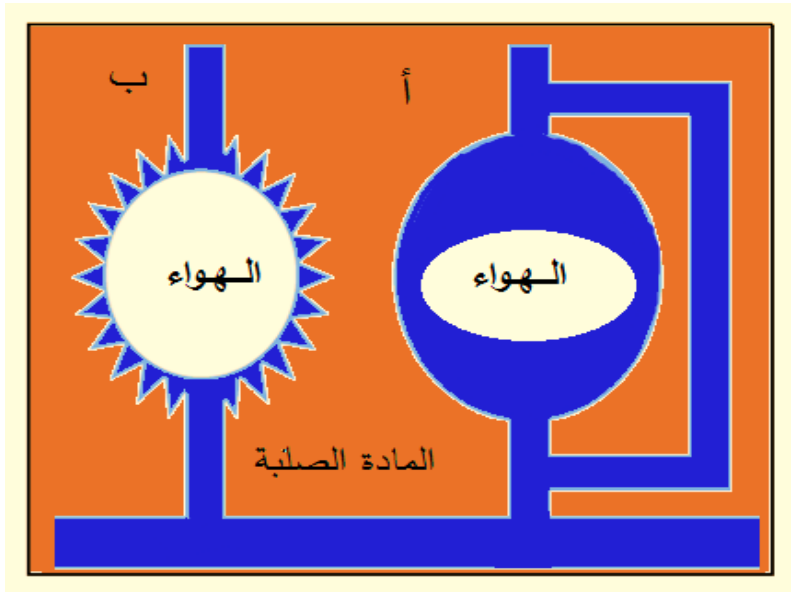
(3)- Rana, Ezzedine, Op.cit,pp 80,81.

(4)-Damien Linoir , Les horizons d'accumulations carbonatées (HAC) en Champagne-Ardenne , répartition régionale, caractérisation et conséquences sur les transferts hydriques, thèse de doctorat , Université de Reims Champagne-Ardenne, France,2014,P 106.



## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

- مسامية محاصرة: تمثل الشبكة التي تبقى محتلة بالهواء، حيث تكون هناك صعوبة لتنقل السوائل، فلا تنتشع الحجارة ولا تستعيد السوائل التي فقدتها (1)، وفي هذا النوع من المسامية تتم محاصرة الهواء في المسام نتيجة انتقال المياه، فحسب Damien Linoir (2) هذه المحاصرة تتم وفق آليتين: الآلية الأولى يتم فيها محاصرة الهواء داخل المسام الكبيرة في مسارات قصيرة، حيث يتجاوزها الماء ويلتف حولها لصالح الشعيرية الدقيقة (الشكل رقم 16:أ)، أما الآلية الثانية فتتم خلالها محاصرة الهواء داخل المسام في مسارات ذات أسطح خشنة بحيث تسمح للماء بالمرور لكن دون ملئها بالكامل (الشكل رقم 16: ب).



الشكل رقم 16: آليات محاصرة الهواء في المسام (أ: اجتياز بالإلتفاف par dérivation، ب: اجتياز بصعوبة مرتبط بخشونة السطح (par la rugosité de surface) (3)

### II- الجليد

يُعتبر الجليد أحد الحالات الفيزيائية الطبيعية للماء عند تحوله للحالة الصلبة، إذ يتجمد الماء عندما يكون نقياً عند درجة حرارة (0م°)، ويمكن خفض نقطة التجمد هذه إلى أدنى من ذلك بكثير إذا اضيف للماء أو أذيبت فيه بعض المواد، وهذا ما يفسر رش الملح فوق أرضية الطرقات في فصل الشتاء لمنع تشكل الجليد (4).

(1) - Charlotte Walbert, Op cit ,p11.

(2) - Damien Linoir, Op.cit. P106.

(3) - Ibid. P107.

(4) -Adrian Rodriguez Garcia, étude de la congélation comme technique de traitement des eaux : applications spécifiques, thèse doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse, France, 2004, P15

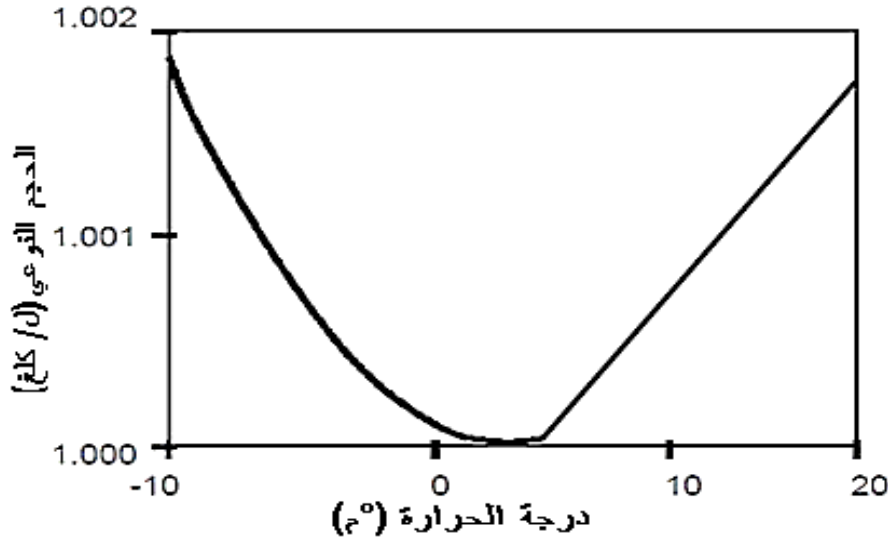
## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

### 1-II- خصائص الجليد (تجمد الماء)

يمتلك الماء عند تحوله إلى جليد خصائص مختلفة، يمكن إجمال أهمها فيما يلي:

#### 1-1-II-زيادة حجم الماء

في البنية الهيكلية المفتوحة يزداد الحجم النوع للماء عند انخفاض درجة الحرارة لأدنى من (4°م)، غير أنه يمكن أن يظل هذا الماء فائق أوشديد البرودة حتى لدرجة حرارة أقل من (-15°م)، كما يظهر في (الشكل رقم 17)، وهذا يعني أن الوسط المسامي مع تشبع معين وعند درجة حرارة (+4°م) سيشهد زيادة في معدل التشبع أثناء التجمد، فإذا كان هناك فائق برودة (Surfusion) سيتم دفع الماء فائق البرودة نحو المسام غير المشبعة أو خارج العينة<sup>(1)</sup>.



الشكل رقم 17: حجم النوعي للمياه في درجات حرارة مختلفة (2)

### 2-1-II- حجم الجليد (تجمد الماء)

عكس الماء فائق البرودة يتناقص الحجم النوعي للجليد (Volume spécifique) مع انخفاض درجات الحرارة، ويمكن حساب الحجم النوعي للجليد وفق المعادلة التالية<sup>(3)</sup>:

$$V_{\text{glace}} = C_0 + C_1 \times T$$

(1) -Céline Thomachot «Modifications des propriétés pétrophysiques de grès soumis au gel ou recouverts "d'encroûtements noirs vernissés" thèse de doctorat - université louis pasteur de Strasbourg ,France,2002 ,p59.

(2) -Ibid, p 60.

(3) - Idem.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

مع  $V_{glace}$ : الحجم النوعي للجليد في درجة الحرارة T

$$C_0 : 1.09078 \text{ كلغ دسم}^3$$

$$c_1 : 1.677 \times 10^{-4} \text{ كلغ دسم}^3$$

T : درجة الحرارة (م°)

ويختلف الحجم النوعي للماء عند تحوله إلى جليد وفق درجة حرارة الوسط كما مبين في الجدول رقم 13.

T م°	الحجم النوعي للماء	الحجم النوعي للجليد	توسّع الجليد	كثافة الجليد
0	1,00013	1,09080	0,09067	0,91676
10-	1,00186	1,08905	0,08719	

الجدول رقم 13: يبين الحجم النوعي للماء والجليد محسوبين انطلاقاً من كثافة ومعامل التوسّع الحراري للجليد<sup>(1)</sup>.

### II-3-1- الخصائص الميكانيكية للجليد

يملك الماء عند تحوله إلى جليد خصائص ميكانيكية تختلف عن تلك الموجودة في الحجارة<sup>(2)</sup>، فعلى سبيل المثال عند درجة حرارة بين (0- و 5-م°) تكون قيم معامل المرونة ومقاومة الضّغط والشّد تتراوح من 7 إلى 27 كغ. سم<sup>-2</sup>، كما هو مبين في الجدول رقم 14.

الخاصية	الجليد
معامل المرونة	27,60 كلغ. سم <sup>-2</sup>
مقاومة الشّد	7 إلى 8 كلغ. سم <sup>-2</sup>
مقاومة الضّغط	25 كلغ. سم <sup>-2</sup>

الجدول رقم 14: يبين الخصائص الميكانيكية للجليد عند درجة حرارة (0 و 5-م°)<sup>(3)</sup>

(1) - Céline Thomachot, Ipid ,p 60.

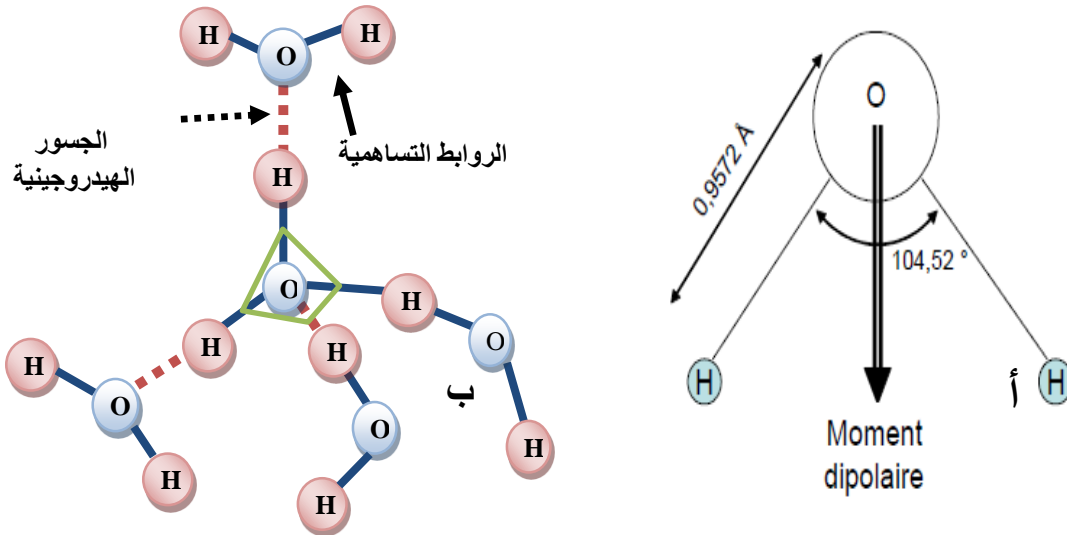
(2) - Idem

(3) - Idem

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

### II-1-4- تجمّد الماء

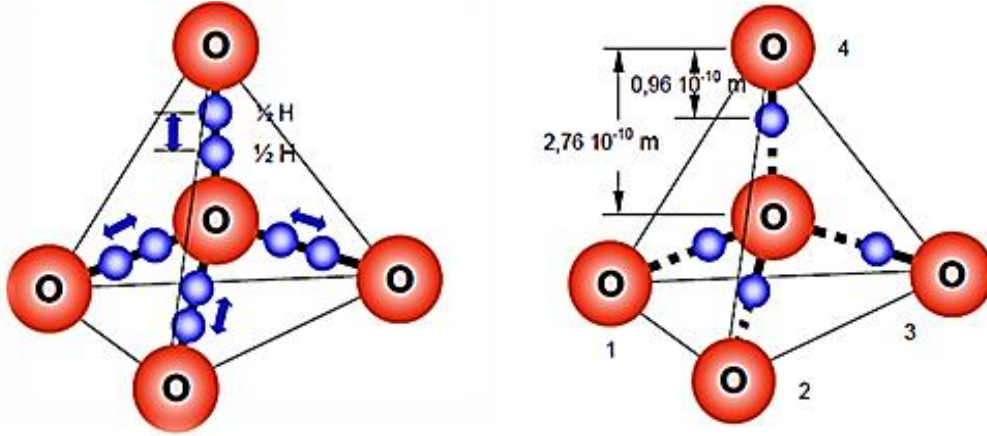
يتكون جزيء الماء الحر من ذرتين من الهيدروجين مرتبطة بذرة أكسجين بواسطة روابط تساهمية، الزاوية H-O-H المشكّلة تقدر بـ  $(104.52 \pm 0.05^\circ)$ ، بينما طول الرابطة O-H يقدر بـ  $0.9572 \text{ \AA}$  الشكل (رقم 18-أ) <sup>(1)</sup>، أما تجمّد الماء (الجليد) فهو تحول فيزيائي طبيعي طارد للحرارة، يحدث نتيجة تجمع جزيئات الماء بشكل منتظم، والتي توظف كل إمكاناتها لإقامة رابطتين تساهميتين من ذرتين من الهيدروجين وإثنين من جسور الهيدروجين مع ذرتين هيدروجين لجزيئات الماء المجاورة لها، تكون كل ذرة أكسجين متموضعة في مركز البنية الرباعية التي تشغل رؤوسها أربعة ذرات أكسجين (الشكل رقم 18:ب)، وهي بدورها تقدم ذرتين لإثنين من جيرانها ذرة (1 و 2) (الشكل رقم 19:أ)، وتلتقط في نفس الوقت ذرتين ينتميان إلى ذرتين أخرتين ذرة (3 و 4) بطريقة تتشكّل أربعة جسور (O-H-O)، بمعنى يجب أن يكون حول كل ذرة أكسجين 4 ذرات هيدروجين، ذرتان منها قريبة متصلة بواسطة روابط تساهمية يرمز لها بالخط المستمر (—)، و الذرتان المتبقيتان مبتعدتان عنها لكن متصلة بواسطة جسور هيدروجينية يرمز لها بخط متقطع (---)، ويكون تبادل مستمر للمواقع بين الروابط التساهمية والجسور الهيدروجينية الشكل رقم 19:ب <sup>(2)</sup>.



الشكل رقم 18: تمثيل تخطيطي (أ: لجزيء الماء <sup>(3)</sup>، ب: لبنية بلورة الجليد) <sup>(4)</sup>

- (1) - Antonin Fabbri, Physico-mécanique des matériaux cimentaires soumis au gel-dégel, thèse de doctorat Génie Civil, Université de Marne la Vallée, France, 2006, p.24  
(2) - Adrian Rodriguez Garcia, Op.cit ,pp 16,17.  
(3) - Antonin Fabbri, Op.cit p24  
(4) - Adrian Rodriguez Garcia, Op.cit p16.

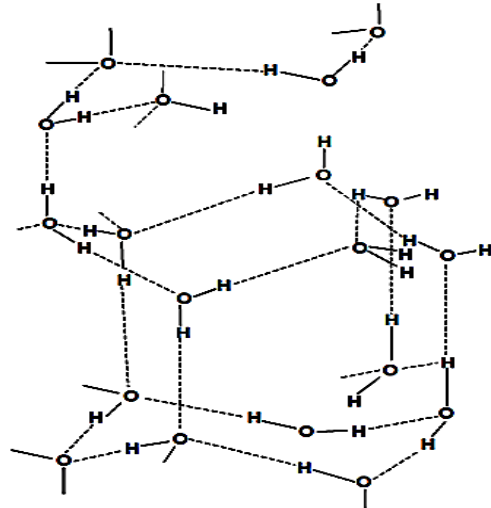
## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة



الشكل رقم 19: تمثيل تخطيطي (أ) -تجمع عناصر جزيئات الماء في الجليد،

ب- تغيير موضع الروابط التساهمية والهيدروجينية (O-H --- O ↔ O --- H-O) (1)

إنّ تجمع العناصر الرباعية الأولية يتم بطرق مختلفة، فالجليد العادي يحتوي على بنية بلورية شبيهة بتكوين مجموعة السيليكا المتنوعة، ويمكن اعتبار هذه التركيبة كسلسلة متتالية من الأوراق الأفقية، تتكون من رصف لسداسيات ملتوية تشغل رؤوسها ذرات الأكسجين، أما في منتصف جوانبها فتوجد ذرات الهيدروجين، حيث تكون كل ورقة هي صورة منعكسة للورقة المجاورة لها، وفي كل ورقة ترتبط كل ذرة أكسجين بأربعة ذرات هيدروجين، ثلاثة منها ترتبط بشكل أفقي، أما الارتباط الرابع فيكون عمودياً بالتناوب مع الورقة التي تعلوها أو التي تقع أسفلها (2)، كما هو موضح في الشكل رقم 20.



الشكل رقم 20: تمثيل تخطيطي لبنية الجليد (3)

(1) - Adrian Rodriguez Garcia ,Ibid, p 17.

(2) -Ibid, p 18.

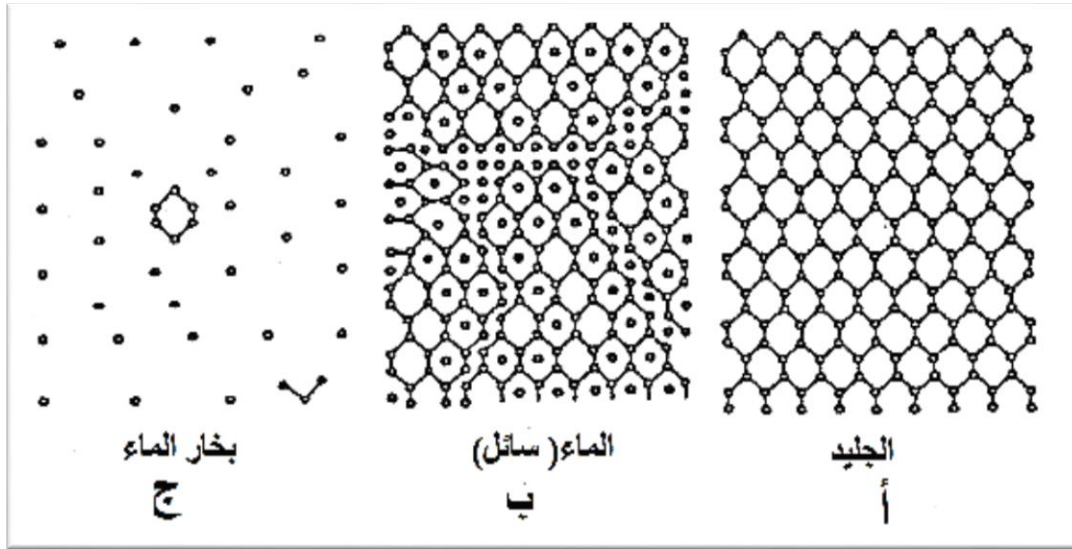
(3) -Ibid, p 18



## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجرة

### II-2- تنظيم جزيئات الماء المتجمدة

خلال عملية تشكّل بلورات الجليد تساهم بنية جزيء الماء التي هي على شكل ثنائي القطب في بناء بنية هيكلية مختلفة عن الحالة السائلة، تتميز بانتظامها وتباعدها وإحتوائها على فراغات كبيرة (الشكل رقم 21)، هذا الإختلاف في بنية الجليد المتشكّل يعود للتباين في ظروف الضّغط ودرجة الحرارة، وهذا ما يفسر انخفاض الكثافة والزيادة في حجم الماء الذي قدر بحوالي 9% خلال تحول الماء من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة (الجليد)، وعندها تكون الكتلة الحجمية للجليد  $\rho_{\text{glace}} = 0.91734 \text{ غ/سم}^3$ ، أما الكتلة الحجمية للماء  $\rho_{\text{eau}} = 0.99987 \text{ غ/سم}^3$  (1).



الشكل رقم 21: يبين تنظيم جزيئات الماء وفقاً لأطوار الماء المختلفة (2).

### II-3- أطوار الجليد

تنظم جزيئات الماء وفقاً لظروف درجة الحرارة والضّغط بشكل هيكل رُباعي الأسطح (Tétraédrique) بفضل الرّوابط الهيدروجينية، ونتيجة لذلك لا تتراكم جزيئات الماء بشكل مضغوط، بل تكون متباعدة عن بعضها البعض، لذا تكون كثافة الجليد أقل من كثافة الماء بحوالي 9%، في حين بلورات الجليد يكون لها بنية سداسية مضغوطة (Hexagonale compacte)، هذه البنية الهيكلية يطلق عليها جليد "h1" أو "Ih"، كما يوجد حوالي 15 نوعاً مختلفاً من الجليد، والذي يختلف باختلاف تركيبه البلوري (3):

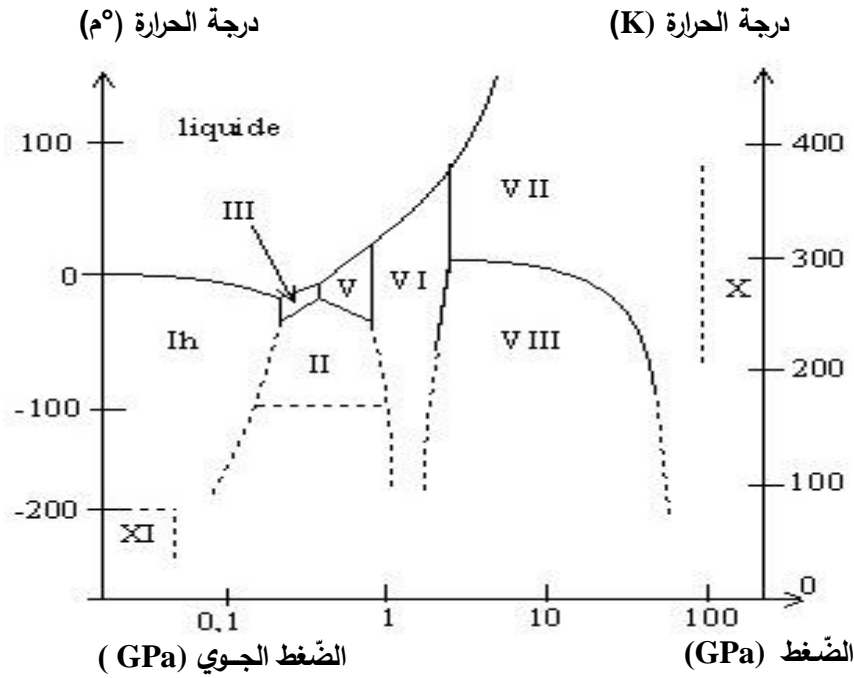
(1) - Céline Thomachot ,Ibid, p61.

(2) - Ibid,p 61.

(3) - Adrian Rodriguez Garcia, Opcit, pp18-19.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

- جليد IC (درجة حرارة منخفضة، Cubique à faces centrées مكعب متمركز الأوجه، الكثافة  $\approx 0,9$ )؛
  - جليد II (درجة حرارة منخفضة، Orthorhombique centrée، معين متعامد المحاور متمركز، الكثافة  $\approx 1,2$ )؛
  - جليد III أو Iii (درجة حرارة منخفضة، رباعي الزوايا، الكثافة  $\approx 1,1$ )؛
  - الجليد V (ضغط مرتفع، درجة حرارة منخفضة، Monoclinique à base centrée، كثافة  $\approx 1,2$ )؛
  - الجليد VI (6) (ضغط مرتفع، درجة حرارة منخفضة، tétragone، الكثافة  $\approx 1,3$ )؛
  - جليد VII (7) (درجة حرارة عالية، ضغط مرتفع، cubique simple، الكثافة  $\approx 1,7$ )؛
  - جليد VIII (8) (ضغط مرتفع، Tétragonal centré، الكثافة  $\approx 1,6$ )؛
  - جليد IX (9) (ضغط عالي، Tétragonal، الكثافة  $\approx 1,2$ )؛
  - جليد XII (12) (ضغط مرتفع، درجة حرارة منخفضة، مربعي، الكثافة  $\approx 1,3$ ) .
- ويمكن تمثيل الأشكال البلورية التي يأخذها الجليد بدلالة الضَّغط ودرجة الحرارة على مخطط الأطوار كما هو مبين في الشكل رقم 22.



الشكل رقم 22: تمثيل بياني لمختلف أطوار الجليد<sup>(1)</sup>

(1) -Ibid, p 19.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

### II-4- المياہ غیر المتجمدة في الوسط المسامي

مما لا شك أن الماء الشاغل للوسط المسامي لا يتجمد بشكل كامل بل يظل جزء منه في حالة سائلة، ويرجع ذلك لعدة أسباب، إما لعدم إمكانية جبهة الجليد الوصول إلى الحجم الكلي للمسام، أو لوجود ظروف توقف أو تمنع تجمد الماء أثناء مرور جبهة الجليد، كأن تكون قنوات الشعيرية دقيقة جداً أو عدم وجود نوى للجليد، وعليه يمكن القول بأن المياہ غير المتجمدة المتواجدة في شبكة المسام تكون في ثلاثة أشكال:

#### أ- الماء الممتز

يتميز هذا النوع من الماء بتكونه من طبقة متعددة الجزيئات من جزيئات الماء المتصلة بجدران الوسط المسامي، سمك هذه الطبقة يعتمد على نسبة رطوبة الوسط ودرجة الحرارة التي تتحكم في التحريض الحراري، في حين جزيئات الماء الممتزة تنتظم وفق هيكل منظم، والذي يعود لتأثير قوى تساهم في ترابط تلك الجزيئات، حيث يمنح للماء الممتز خصائص تختلف عن تلك الموجودة في الماء الحر، فعلى سبيل المثال، تكون درجة حرارة تجمده منخفضة جداً قد تصل إلى عتبة (-200م) مقارنة مع الماء الحر الذي تقدر درجة حرارة تجمده (~0م)، أو ماء الشعيرية الذي تصل درجة حرارة تجمده إلى (-90م) (الشكل 23: أ، ب)، وفي نفس الصدد فقد أظهرت الدراسة التي قام بها كل من Bernard و Aguirre-Puente عام 1978، انطلاقاً من نموذج ثنائي الأبعاد، يمكن إيقاف تقدم جبهة الجليد من خلال تشكيل حاجز يتمثل في طبقة من المياہ الممتزة (Eau adsorbée)<sup>(1)</sup>.

ومما سبق نستخلص بأن الحفاظ على سلامة الحجارة من خطر الجليد يمكن تحقيقه من خلال الإبقاء على استمرارية حركة الماء في الوسط المسامي، وذلك عن طريق خفض نقطة تجمده تحت درجة 0م، وذلك بتغيير طبيعة الماء في الوسط من الحر إلى الممتز.

#### ب- ماء الشعيرية

في ظل ظروف معينة يبقى جزء من مياہ الشعيرية الحرة سائلة بالرغم من مرور جبهة الجليد، قد يعود ذلك إما لمحتواها الأيوني العالي، أو لصغر حجم المسامات، مما يساهم في خفض نقطة تجمد الماء الحر في هذه المسامات، ومن هذا المنطلق يمكن

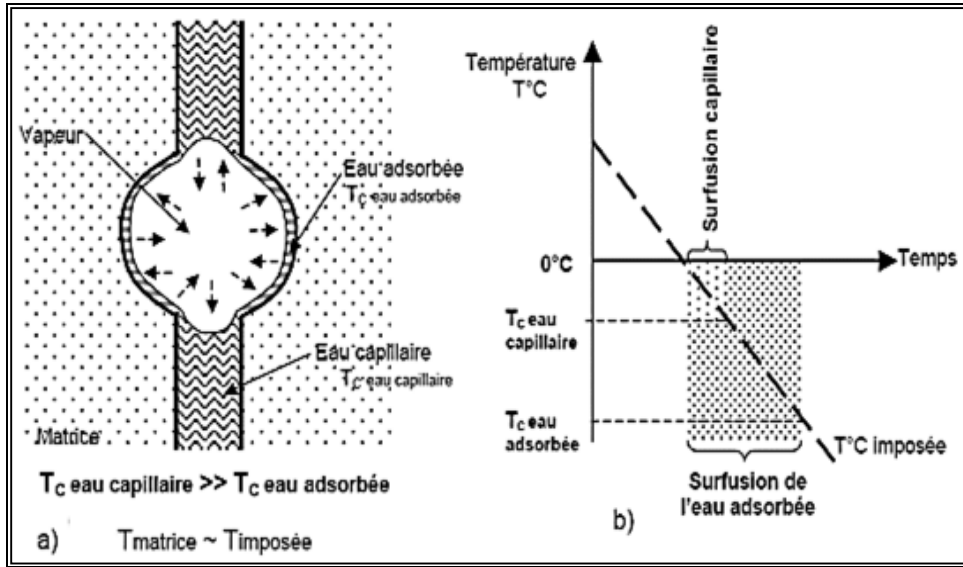
(1)-Céline Thomachot ,Ibid, p 61-62.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجرة

القول، بأن درجة حرارة التجمد أو تشكّل الجليد تنخفض مع زيادة تركيز الأيونات، فعلى سبيل المثال يساهم استخدام أملاح إزالة الجليد في زيادة تركيز الأملاح في مياه المسام، مما يعمل على منع تشكّل الجليد (الشكل رقم 23: أ، ب) (1).

### ج- بخار الماء

بالإضافة إلى الأشكال السابقة للمياه غير المتجمّدة في الوسط المسامي خلال عملية التجمد، قد يوجد الماء في صورة بخار ماء، لأنّ في حالة التّشبع الجزئي يظل جزء من شبكة المسامية محتويًا على فقاعات هواء فيما يعرف بالمسامية المحاصرة (الشكل رقم 23: أ)، فوجود مزيج من الهواء والماء الذي يكون على شكل غاز في الوسط المسامي، يُعد عاملاً مهماً في خفض شدّة الضغوط التي تطورت خلال مرحلة تحول الماء إلى جليد، كما أنّ ضغط الهواء يمكن أن يسمح لجبهة الجليد بالإنبثاق من المسام، مما يحدّ من تطور الضغوط المتولدة في الشبكة المسامية (2).



الشكل رقم 23: أ- رسم تخطيطي لتوزيع الأشكال المختلفة للمياه غير المتجمّدة في الوسط المسامي أثناء التجمد: ماء الشعيرية، المياه الممتزة، ومياه بخار الماء المتوازنة حسب درجة الحرارة (الأسهم المتقطعة)، الرطوبة النسبية والضغوط التي يطبقها الجليد على الوسط، (ب)- رسم تخطيطي لدرجات حرارة التجمد المقابلة (م°) (3).

(1)-Idem.

(2)-Idem.

(3)-Ibid, p61.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

### II-3- دورات التجمد والذوبان التي تتعرض لها الحجارة

لقد كشفت دراسة البيانات المناخية وتفاعلها سواء مع الجدران الصخرية، أو الحجارة المستخدمة في المباني عن وجود نوعين من دورات التجمد والذوبان، قد تكوني بشكل يومي أو موسمي (1).

#### II-3-1- التجمد والذوبان اليومي للماء

يؤثر التجمد والذوبان اليومي للماء على الصخور أو الحجارة لبضعة سنتيمترات، إذ يحفز كل من الشقوق والشروح وحتى المسام على التوسع بشكل متناسب مع تقدم الجليد، بالإضافة إلى تأثير التعب بفعل الإجهاد الحراري أثناء التغيرات في درجات الحرارة (2).

ويكون الجليد أكثر نشاطاً كلما ارتفعت درجة تشبع الحجارة بفعل عملية ذوبان الجليد التي تحدث نهاراً والتجمد الذي يحدث ليلاً (3)، وعليه فعدم استقرار حالة الحجارة يرتبط بشكل كبير بدورات التجمد والذوبان التي تكون أكثر تأثيراً مع توالي أيام التجمد والذوبان.

#### II-3-2- التجمد والذوبان الموسمي للماء

يساهم التجمد والذوبان الموسمي للماء الشاغل للوسط المسامي للحجارة في فتح وانتشار الشقوق، كما يتسبب في حدوث تمزقات وتشققات تكون أكثر اتساعاً من تلك التي يحدثها التجمد والذوبان اليومي، وبشكل عام يمكن القول بأن التجمد والذوبان الموسمي يتم على ثلاث فترات في السنة، خلال فصل الخريف حيث يستقر الجليد في عمق الحجارة، وفي فصل الشتاء حيث يتشكل الجليد على مستوى السطح، كما قد يرافقه أحياناً ذوبان سطحي للجليد خلال النهار، أما في فصل الربيع فيحدث ذوبان للجليد وتتسرب على إثره المياه الدائبة وتتغلغل لأعماق الصخور والحجارة التي تكون درجة حرارتها ما تزال منخفضة، مما يؤدي لتجمدها مرة أخرى، وبذلك يتم توليد توترات شديدة في عمق الشقوق والمسافات، تتسبب في توسع المسام، وانتشار الشقوق وتوسعها، الأمر الذي قد يتسبب في تصدع أو تمزق أو انفلاق كلي لهذه الحجارة (4).

(1) -Marion Bost, 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, 2008, p76.

(2) - Saad alic, Op.cit ,p17.

(3) - Marion bost, ,Op.cit , pp 46,47

(4)- Ibid,p76.



## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

### II-3-3- أنوع الجليد

يصنف الجليد حسب طبيعة تشكّله وزمن حدوثه والأضرار التي يلحقها إلى عدة أنواع نذكر أهمها فيما يلي:

#### II-3-3-1- الجليد المتحرك

يحدث الجليد أو الصقيع المتحرك في المناخات التي تعرف تتقل الكتل الهوائية الباردة إلى المنطقة الدافئة لإستبدال الهواء الأكثر دفئاً (الشكل رقم 24: أ)، حيث تنخفض على إثره درجة الحرارة وتقل عندها السعة الحرارية اليومية، وبسبب تجدد الهواء البارد باستمرار يصعب مقاومة هذا الجليد المتحرك، فضلاً عن ذلك، فهذا النوع من الجليد يحدث غالباً في فصل الشتاء، ونظراً لتكرار حدوثه يطلق عليه أحياناً بالجليد الشتوي أو الجليد الأسود<sup>(1)</sup>.

#### II-3-3-2- الجليد الإشعاعي

يحدث الجليد الإشعاعي أو الجليد الأبيض نتيجة فقدان الحرارة في شكل طاقة مشعة في ليالي الشتاء والربيع الصافية الخالية من الرياح والغيوم، إذ تنخفض خلالها درجة الحرارة بشكل أسرع في المناطق القريبة من السطح، حيث يتسبب في انعكاس الحرارة (ترتفع درجة الحرارة طردياً مع الإرتفاع فوق سطح الأرض)، بمعنى يكون تبريد الهواء أكثر وضوحاً في الجزء السفلي خاصةً في الأمطار العشرة الأولى من الغلاف الجوي كما هو ممثل في الشكل (رقم 24: ب)<sup>(2)</sup>.

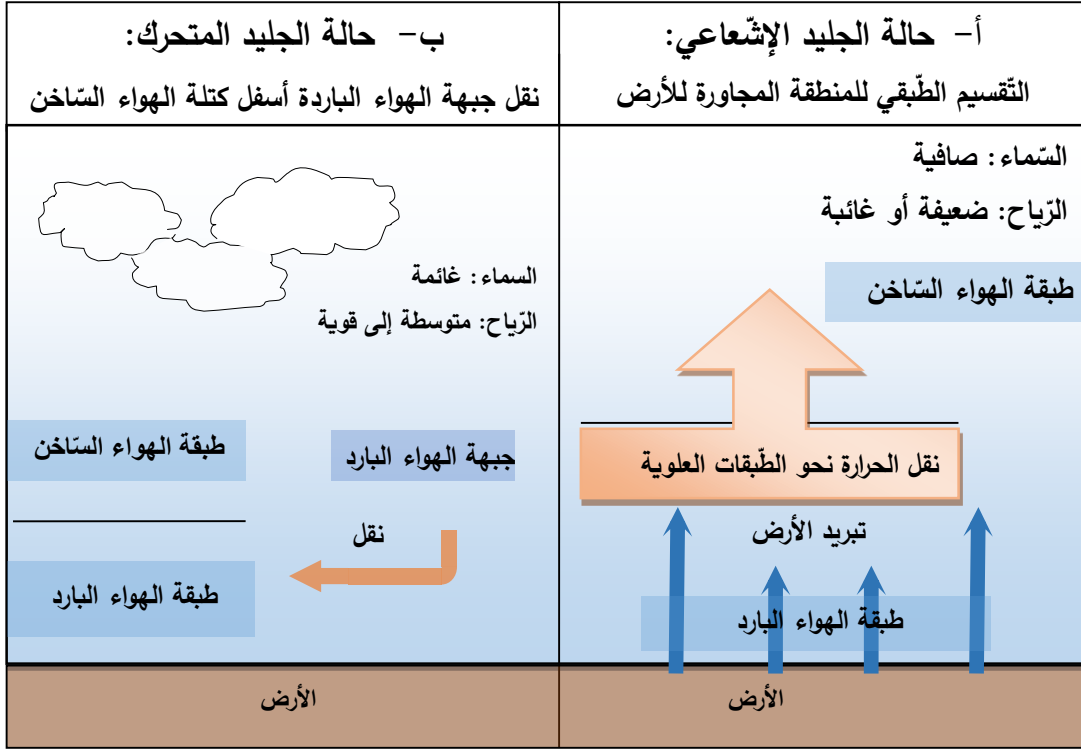
كما تكون حرارة الهواء الملامس لسطح التربة أقل من درجة حرارة الهواء على ارتفاع مترين بحوالي 3°م، لذا تظهر في فصل الربيع بلورات جليدية بيضاء على سطح التربة، لذلك يسمى بالجليد الربيعي أو الجليد الأبيض<sup>(3)</sup>.

(1)- على عباس، الصقيع التنبؤ بحدوثه ومقاومته، وزارة الزراعة السورية، ط 2، بدون تاريخ، سوريا، ص 5.

(2)- www.frostprotection.com, [consulté le 15 octobre 2019].

(3)- على عباس، مرجع سابق، ص 5.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة



الشكل رقم 24: تمثيل تخطيطي لعمليات تشكّل الجليد المتحرك والإشعاعي (1)

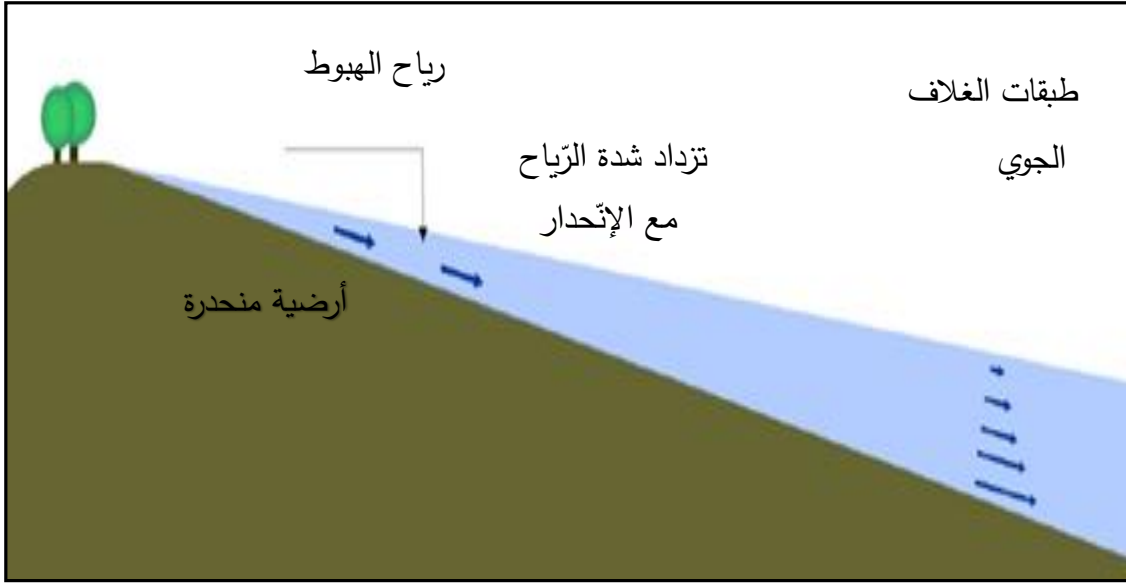
### II-4-3- تأثير التضاريس على تشكّل الجليد

تحدث عملية تشكّل الجليد في المناطق المنخفضة نتيجة تدفق كتل كبيرة من الهواء من المناطق المرتفعة ذات طبقات الهواء الأكثر برودةً وكثافةً إلى المناطق المنخفضة ذات طبقات الهواء الدافئة، هذا التدفق أو تحرك الهواء يحدث وفق ظاهرة يطلق عليها "رياح المنحدر أو الهبوط" (Vent de descente) كما هو ممثّل في (الشكل رقم 25)، والتي تتسبب في تدرج طبقي للرياح، حيث تزداد شدة برودتها أثناء انتقالها من أعلى نحو أسفل المنحدر (الوادي)<sup>(2)</sup>، وهذا ما يفسر تقاوم تدهور الحجارة بفعل الجليد، حيث يكون في المناطق المنخفضة أكبر منه في المناطق المرتفعة، وبما لا يدع مجال للشك ينطبق هذا الأمر على طبوغرافية الموقع الأثري لجميلة، كونه منجز على أرضية منحدر ذات ارتفاعات تتراوح من 900 م إلى 700م، وعلى هضبة محصورة بين ضفتي وادي بيطام (من الشرق) وقرقور (من الغرب).

(1)-Joël Rochard et all, Itinéraires N° 27, La Grêle et le Gel de printemps : Comment s'en Protéger, L'institut Français de la vigne et du vin, France ,2018.P16. Modifie

(2) -www.frostprotection.com ,[consulté le 15 octobre 2019].

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة



الشكل رقم 25: تمثيل بياني لهبوب الرياح في المنحدر (1)

### II-3-5- تصنيف مستوى جليد المنطقة

تعتمد كفاءة مقاومة الحجارة ليس فقط على موضعها في البناء، بل أيضاً على النطاق الجغرافي الذي يقع فيه المبنى المتشكّل منها، ومستوى جليد المنطقة، فحسب المعيار الأوروبي NF EN 771-6 الذي يصنف مناطق الجليد طبقاً لعدد أيام تشكّله ودرجة الحرارة إلى أربعة مناطق<sup>(2)</sup>:

- المنطقة أ (تجمد ضعيف جداً): لا يزيد عن يومين في السنة، درجة حرارة أقل من -5°م؛
- المنطقة ب (تجمد ضعيف): لا يزيد عن 4 أيام، مع درجة حرارة أدنى من (-6°م)؛
- المنطقة ج (تجمد معتدل): لا يزيد عن 10 أيام في السنة، درجة حرارة أقل من (-10°م)؛
- المنطقة د (تجمد شديد): أكثر من 10 أيام في السنة، مع درجة حرارة أقل من (-10°م)؛

وبالنظر للمعطيات المناخية لمنطقة جميلة الميمنة في الفصل الأول، والتي يتبين من خلالها أنها تتميز بتشكّل جليد أكثر من 10 أيام في السنة يقدر بـ 79 يوماً ودرجة حرارة أقل من (-10°م)، لذا فهي تدخل ضمن المنطقة (د) ذات التجمد الشديد.

(1) -Ibid.

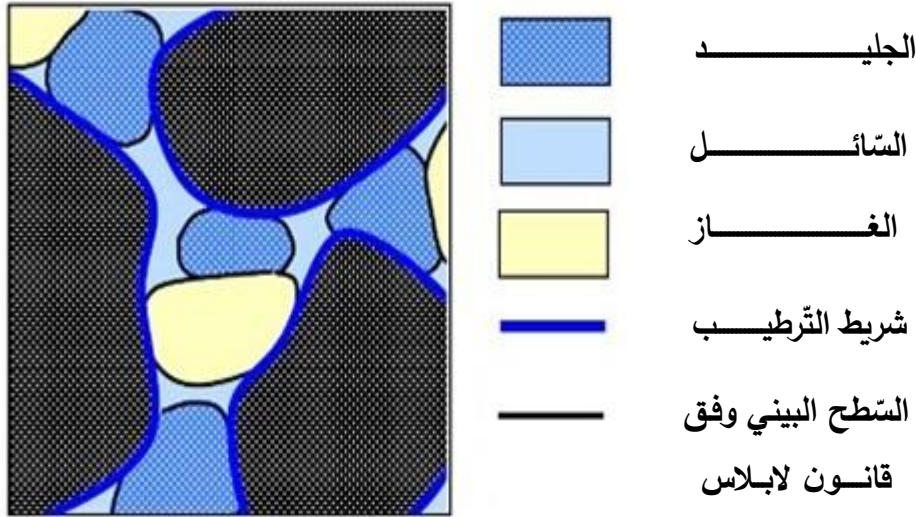
(2) -Frédéric Magnent, Op.cit, p34.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجرة

### III- آلية تجمّد السوائل والضغوط المتولدة في الحجرة

#### III-1- تجمّد السوائل في المسامات

عند انخفاض درجة حرارة المسام يكون السائل الذي يشغلها مرجحاً للتجمّد الجزئي، ويطلق على هذه المرحلة الصلبة الجديدة بجليد (h1)، ويؤدي الجليد المتشكّل إلى تكوين ثلاثة أنواع من السطوح في الوسط كما هو موضح في الشكل (رقم 26)، سطح بيني بين الجليد والغاز، وسطح بيني بين الجليد والسائل الذي يعد مركز التوتر السطحي، وسطح بيني بين الجليد والجسم الصلب للمسام الذي يشكل شريط لا يتجمّد (1).



الشكل رقم 26: تمثيل بياني لتجمّد السائل الفراغي Interstitiel (2)

#### III-2- تشكّل الجليد في الوسط المسامي

يبدأ تشكّل الجليد من الماء الحر في الضّغط الجوي انطلاقاً من درجة حرارة 0°م كما هو مبين في (الشكل رقم 27)، ويتكون الجليد من جزيئات الماء مرتبطة بروابط الهيدروجين ومرتبطة في شبكة سداسية الشكل (رقم 20)، حيث تُكوّن أربعة جزيئات لكل خلية وحدة (Cellule unitaire) بكثافة  $3,074 \times 10^{28}$  جزيئة في المتر المكعب، ما يعادل كثافة 0,9197، هذه الكثافة من الجليد عند 0°م تزيد في الحجم بنسبة 9,1% مقارنة بالماء

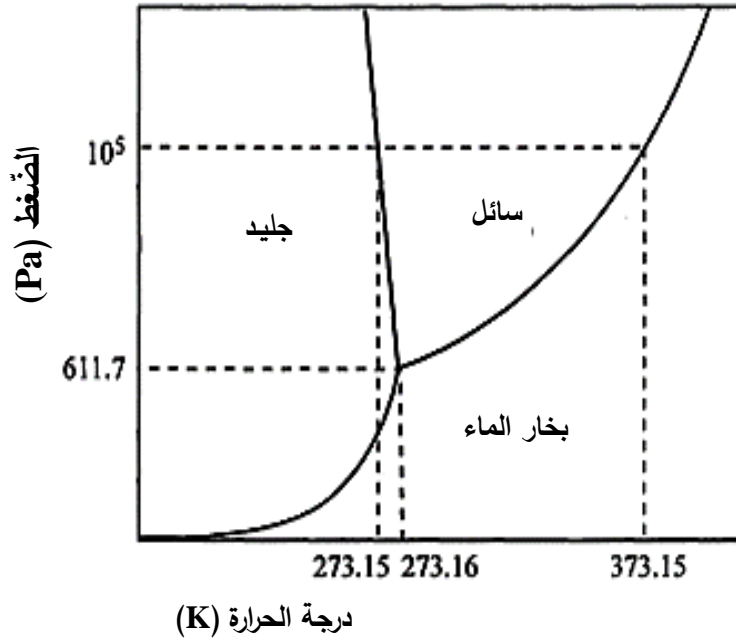
(1)-Jean-François Daïan, Op.cit, p57.

(2)- Ibid, p58.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

السائل، أما الماء الذي يشغل مسام الحجارة فيبدأ تجمده عند درجات حرارة أدنى بكثير من 0°م، ويرجع هذا الإلتخفاض في درجة حرارة التجمد لحجم المسام الذي يعدل من ظروف التجمد، حيث في ظل ظروف معينة من الضّغط ودرجة الحرارة يتشكّل الجليد على مرحلتين، مرحلة تشكّل النوى أو التّئوي\* la nucléation، ومرحلة نمو البلورات(1).

وما إنّ تبدأ عملية التّئوي حتى تبدأ جزيئات الماء بالتّجمع حول نوى معزولة على السّطح أولاً، ومع استمرار الإلتخفاض في درجة الحرارة تنمو تلك البلورات الجليدية المتشكّلة وتتقدم إلى عمق المسام التي يبدأ حجمها بالتناقص تدريجياً مع تقدم جبهة الجليد حتى يشغل الجليد كامل حجم المسام(2).



الشّكل رقم 27: مخطط أطوار الماء (3)

\*-يقصد بالتّئوي ولادة الجليد في السائل عند درجة حرارة معينة، ولا يمكن أن يحدث التّئوي إلا في المسام التي حجمها يكون كبيراً بما يكفي لإحتواء بلورات الجليد التي تكون دائماً في نمو كلما انخفضت درجة الحرارة، ولذلك يؤثر التّئوي على المسام فيتناقص حجمها تدريجياً كلما تقدمت جبهة الجليد (أنظر Charlotte Walbert ص14).

(1) -Charlotte Walbert, Op.cit ,p13,14.

(2) -Jean-François Daïan , Op.cit, p,61.

(3) -Charlotte Walbert, Op.cit ,p,14.



## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

### III-3- آليات تشكل الضغوط في الحجارة

تحدث ظاهرة تجمد الحجارة بإشتراك عاملين، هما درجة الحرارة والماء، فعند انخفاض درجة حرارة الحجارة إلى ما دون  $0^{\circ}\text{C}$  يتجمد الماء المتواجد في مساماتها ويزداد حجمه مما يولد ضغوطاً متزايدة تلحق أضراراً كبيرةً بالحجارة إذا تجاوزت قوة تماسكها ومقاومتها الميكانيكية (1)، أما بخصوص آلية التدهور التي تحدث بفعل الجليد، فقد اقترحت عدة نظريات والتي في مجملها هدفت إلى تفسير التلف الكامن وراء الجليد، إلا أننا سنذكر أهم هذه النظريات المتعلقة بالتدهور الشائع بالحجارة (التشقق والتقشر والتحجيم).

### III-3-1- نظرية الضغوط الهيدروليكية

تُعد نظرية الضغوط الهيدروليكية أولى النظريات التي قُدمت لتفسير الأضرار التي تلحق بالحجارة بفعل الجليد من طرف العالم Powers في عام 1949م، وهي تقوم على مبدأ الزيادة في الحجم المقدر بـ 9% المصاحبة لتشكّل وتوسّع الجليد في المسام، هذا التوسع يتسبب في هجرة أو طرد جزء من المياه التي لم تتجمد بعد بإتجاه المسام الأصغر منها أو المليئة بالهواء لإيجاد مخرج أو التخفيف من الضغط، هذه المياه المطرودة تلقى مقاومة كبيرة من طرف الشبكة المسامية مما يتولد عنها ضغوط متزايدة يطلق عليها الضغوط الهيدروليكية، بمعنى أنّ الضغوط الهيدروليكية تتولد من خلال مقاومة الإحتكاك التي تعارض حركة تنقل المياه في الحجارة، ومع ذلك، فإن مراقبة حركات المياه، لا يتم من مناطق تكوين الجليد إلى المناطق غير المتجمدة ولكن من المسام غير المتجمدة إلى جبهة الجليد، دفعت Powers إلى تعديل هذه النظرية (2).

فضلاً عن ذلك، تكون هذه المقاومة كبيرة إذا كان معدل التبريد مرتفعاً وكمية المياه المتجمدة كبيرة جداً، والمسافة التي تقطعها المياه للوصول إلى جدران المسام كبيرة (عامل البعد) (3)، وفي حالة عدم توفر مساحة كافية لتوسع الجليد تزداد الضغوط على جدران المسام والشقوق التي لم تتجمد بعد، مما يساهم في زيادة حجم المسام و/أو توسع وانتشار الشقوق، كما يمكن أن يتحرر الماء الذي لم يتجمد بعد عندما يجد منفذاً (4).

(1) -Sarah janvier-badosa, le carnet de santé d'un monument, application au château de Chambord, thèses de doctorat, université d'Orléans, France, 2012, p150.

(2) - Marion Bost, Op.cit, p63

(3) - Céline Thomachot, Op.cit, p.62.

(4) -Ibid, p63.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

### III-3-2 - نظرية الضغوط الأسموزية

تقوم نظرية الضغوط الأسموزية التي طورها كل من Powers و Helmuth 1953م على مبدأ عدم التوازن في تركيز المحلول بين المسام الكبيرة المتجمدة جزئياً والمسام الأصغر منها، عدم التوازن هذا هو أصل ظاهرة الضغط الأسموزي التي تحفز انتقال الماء من المسام الأصغر نحو المسام الأكبر منها لإعادة التوازن في تركيز المحلول، فإذا كانت المسام الكبيرة ممتلئة يمكن للضغوط الأسموزية عندها أن تؤدي إلى تشقق وانفلاق الحجارة إذا تجاوزت مقاومتها، غير أنه عندما يدخل الماء للمسام الكبيرة ينخفض على إثره تركيز المحلول، لكن يؤدي إلى تكوين جليد إضافي يساهم بدوره في زيادة شدة الضغوط الهيدروليكية المتولدة، مما يضاعف الفعل الإتلافي للجليد (1).

وتجدر الإشارة إلى أنّ فعل الضغوط الأسموزية يصبح أكثر وضوحاً مع انخفاض درجات الحرارة، كون الجليد المتشكّل يمكنه أن يخترق عدداً أكبر من المسام كلما طالت مدة المرحلة (مرحلة تشكل الجليد)، وبذلك يزداد فعله الإتلافي.

### III - 3 - 3- نظرية الضغوط الشعرية (EVERETT 1961)

يقوم نموذج الضغوط الشعرية المعد من طرف EVERETT عام 1961م على مبدأ التوازن الحراري الديناميكي للسطح البيني بين الماء والجليد (l'interface eau-glace) الذي يحفز حرارة التجمد في المسام وفقاً لحجمها، حيث تنمو بلورات الجليد أولاً في المسام الأكبر بينما في المسام الأصغر تبقى المياه سائلة غير متجمدة تفضّل التحرك نحو المسام الأكبر منها، مما يساهم في التغلب على الإختلال الحراري الديناميكي الموجود في السطح البيني بينهما (الجليد والماء)، مما يولد ضغوطاً متزايدة قد تغير البنية الداخلية للحجارة خاصة ضعيفة التماسك تحت فعل توسع الجليد داخل المسام بواسطة succion cryogénique شفط أو امتصاص البرودة، هذا هو مبدأ انتفاخ التربة المتجمدة.

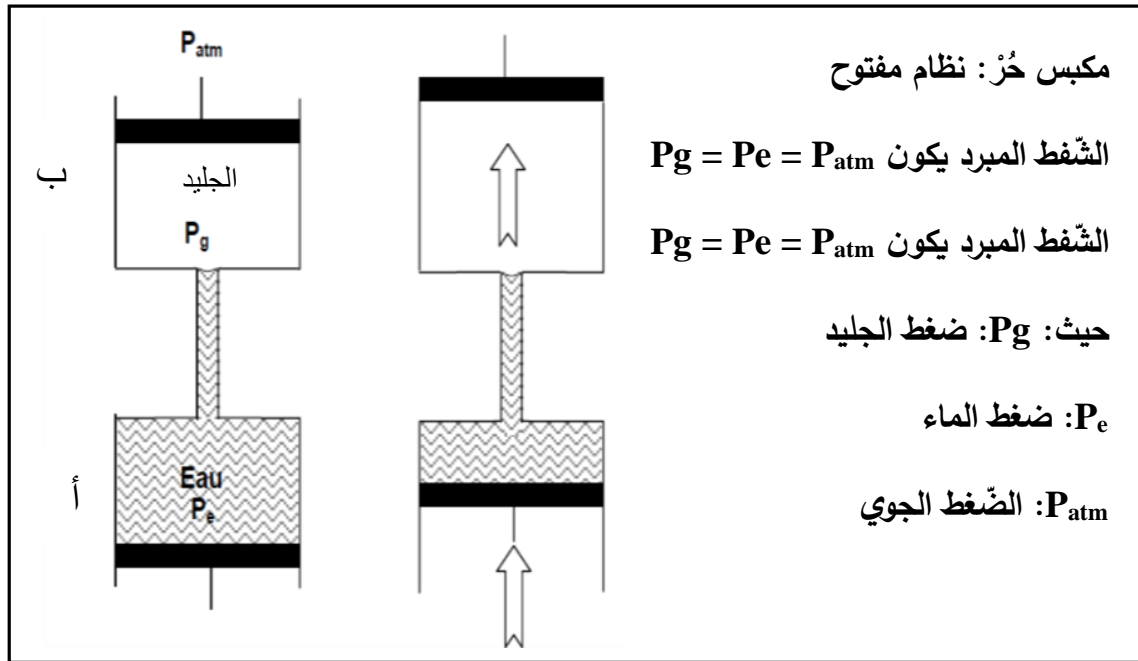
أما إذا كانت الحجارة متماسكة بما فيه الكفاية فالجليد الذي تغذيه الإمدادات المائية

(1) - Marion Bost, Op.cit, p ,63

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجرة

يولد ضغوطاً تفضل التوسع في المسام الأكثر صغراً بدلاً من دفع جدران المسام الأكبر، حيث كلما كان فرق الحجم بين هذه المسام كبيراً كانت الضغوط المتطورة شديدة ومتلفة<sup>(1)</sup>.

ولا شك أن شبكة المسامية تعمل وفق آلية معقدة، فخلال تشكل بلورات الجليد في المسام الكبيرة يتم جذب المياه التي لا تزال سائلة في المسام الدقيقة نحو المسام الأكبر منها بما يعرف بظاهرة شفط البرودة، وفي هذه الحالة يشبه EVERETT شبكة المسامية بالخرانات الكبيرة تكون متصلة ببعضها البعض بواسطة قنوات شعرية دقيقة كما هو ممثل بين الخزانين (أ و ب) التي تمثل مسامات كبيرة كما هو ممثل في الشكل (رقم 28)، ويتم التحكم في الضغط من خلال مكابس قد تكون ثابتة أو غير ثابتة (متحركة)، فإذا كان الوسط مفتوحاً يكون حينها صمام الخزان (ب) متحركاً كما هو الحال في التربة، حيث يكون تماسك الحبيبات ضعيفاً جداً، وتكون هجرة مياه الشعيرية نحو مواقع تشكل الجليد بشكل حُر عن طريق شفط البرودة، مما يؤدي إلى ارتفاع التربة المتجمدة<sup>(2)</sup>.



الشكل رقم 28: تمثيل تخطيطي لنموذج الضغوط الشعيرية في النظام المفتوح،

تكون هجرة المياه بالشعرية من الخزان (أ) نحو الخزان (ب) لتتجمد<sup>(3)</sup>

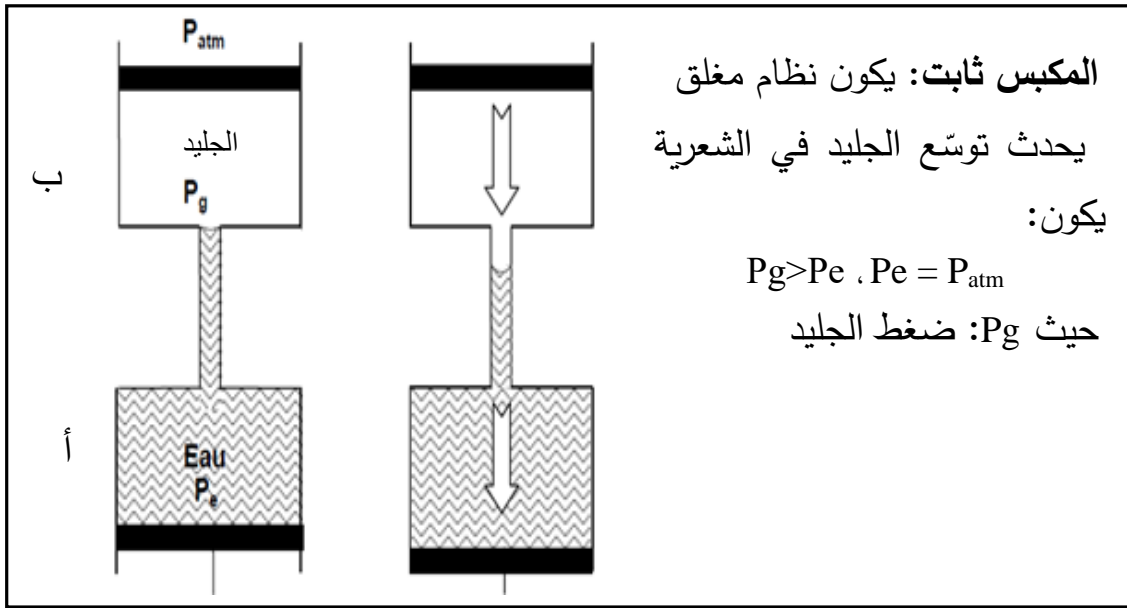
(1) - Ibid ,p 64.

(2) - Céline Thomachot, Op.cit, p64.

(3) - Ibid p64.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجرة

أما إذا كان النظام مغلق فيكون عندها صمام الخزان (ب) ثابتاً غير متحرك كما ممثل في الشكل (رقم 29)، وعندما تمتلئ المسام الكبيرة تماماً بالجليد كما هو ممثل في الخزان (ب) يبدأ نمو جليد إضافي يؤدي إلى زيادة ضغط تبلور الجليد ليصل لمرحلة شديدة تعرف بالضغط الحرج ( $P_{cr}$ ) حيث يتم عندها قذف الجليد في الشعيرة الدقيقة بدلاً من الإستمرار في الضغط على جدران المسام الكبيرة كما ممثل في الشكل (رقم 29) ينطبق هذا على شبكة مسامية حيث يسمح تماسك الحبيبات لجدران المسام بمقاومة الضغوط<sup>(1)</sup>.



الشكل رقم 29: تمثيل تخطيطي لنموذج الضغوط الشعيرية في نظام مغلق،

تمدد الجليد في الشعيرة من الخزان (ب) نحو القنوات الشعيرية<sup>(2)</sup>

في حين تطور الضغوط يعتمد بشكل أساسي على تجانس الشبكة المسامية، إذ يمكن أن يتطور الضغط في منطقة التماس بين المسام الصغيرة والكبيرة بما يتناسب مع أقطارها ( $1/r - 1/R$ ) (الشكل رقم 30)، ويحسب الضغط المتولد وفق العلاقة التالية<sup>(3)</sup>:

$$P = P_g - P_e = 2 \cdot d\sigma \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right)$$

حيث  $d\sigma$  : الفرق بين الطاقة السطحية البينية للمياه والجليد (N.m-1)

(1) -Céline Thomachot ,Ibid. p65.

(2) -Ibid , p65.

(3) -Ibid, p65.

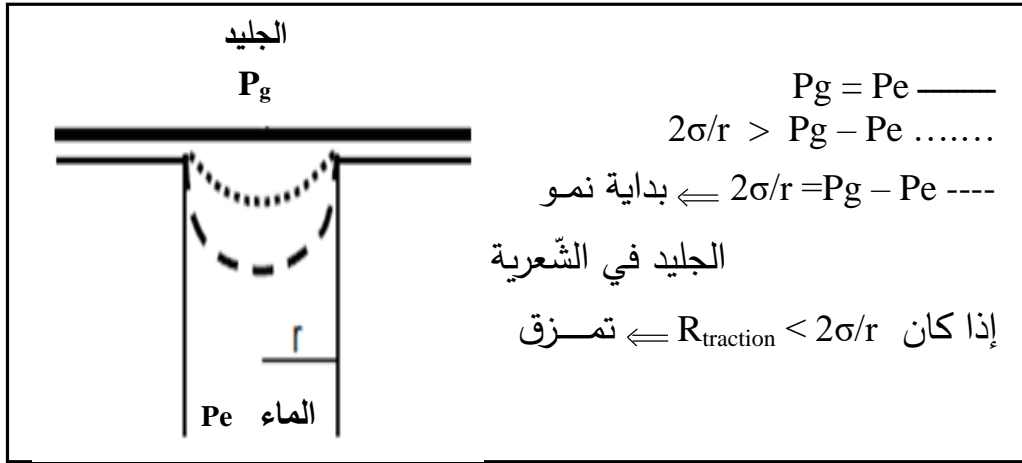
## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

- r : نصف قطر المسام الصغير

- R : نصف قطر المسام الكبير

$P_g$  و  $P_e$  : الضغوط المتولدة بفعل الماء والجليد ( $N.mm^{-2}$ ) على الترتيب.

وعندما يكون  $P_g = P_e$  تحدث حالة التوازن في الوسط أي يكون الجليد والماء في حالة توازن، وعندها لا يدخل الجليد في القنوات الشعيرية (Capillaire)، أما إذا أصبح ضغط الجليد يفوق ضغط الماء تتحقق العلاقة التالية: ( $P_g - P_e = 2\sigma / r$ )، كما هو مبين في الشكل (رقم 30)، وعندها يبدأ النمو التدريجي للجليد في الشعيرية.



الشكل رقم 30: المراحل المختلفة لإختراق الجليد في الشعيرية  
وفق نظرية الضغوط الشعيرية (1)

### III - 4- آلية تدهور الحجارة تحت فعل الجليد

يرجع تدهور الحجارة بفعل الجليد لعدة ظواهر فيزيائية، أبرزها الإجهاد الحراري والتوسع في الحجم المرتبط بتحول الماء إلى جليد، بالإضافة لتأثير هجرة المياه غير المتجمدة، حيث يرافق تحول الماء إلى جليد زيادة في الحجم تقدر بحوالي 9,1%، هذه الزيادة هي المسؤولة عن الإجهاد الداخلي المؤدي لتدهور البنية الداخلية للحجارة نتيجة توسع حجم المسام، و/أو تولد شقوق جديدة و/أو توسع الشقوق الموروثة مسبقاً، في حين هجرة الماء غير المتجمد تؤدي إلى توليد ضغوط هيدروليكية و/أو أسموزية و/أو شعيرية، والتي تضعف أو تتلف البنية الداخلية للحجارة إذا تجاوزت مقاومتها، هذه الضغوط تتولد نتيجة اختلاف

(1)-Céline Thomachot ,Ibid , p65.

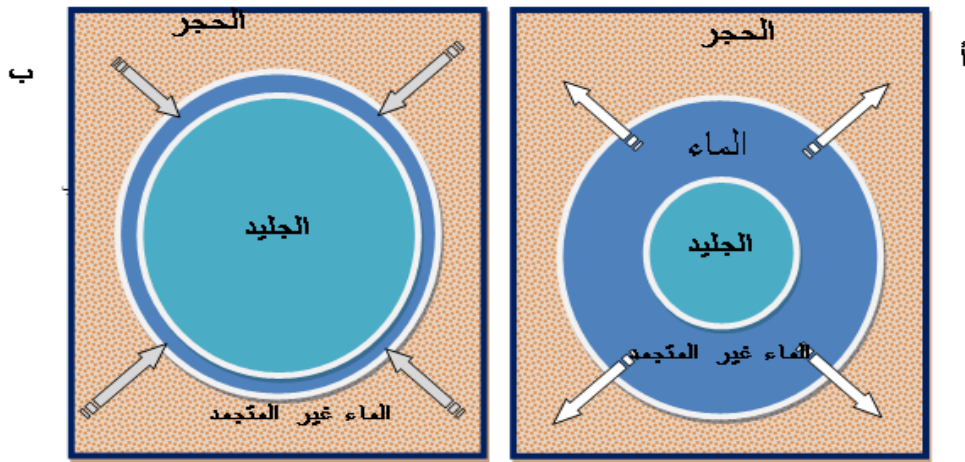


## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

ظروف الضَّغط في المسام والشَّقوق بسبب عدم تجمد الماء الذي يشغلها في نفس الوقت، إذ يبدأ نمو الجليد في المسام الكبيرة أولاً، بينما في المسام الأصغر يبقى الماء سائلاً، والذي يتم طرده من شبكة المسامية، مما يؤدي إلى توليد ضغوط على جدران المسام و/أو الشَّقوق كما هو موضح في الشكل (رقم 31:أ).

وبالرغم من نمو الجليد إلى الحجم الحرج في فضاء المسام إلا أنه يبقى جزء من الماء غير المتجمّد في شكل شريط سائل يفصل بين جبهة الجليد وجدران المسام (الشكل رقم 31:ب)، شريط الماء غير المتجمد هذا يتفاعل مثل السطح المحدب ويولد ظاهرة suction الشَّفط، وفي نفس الوقت يهاجر هذا الماء السائل نحو جبهة الجليد ليتجمد (اتجاه هجرة الماء يكون عكسي من الداخل نحو الخارج)، مما يُؤدِّد ضغوطاً كبيرة تعرف بظاهرة الشَّفط أو امتصاص البرودة (phénomène de cryosuccion)<sup>(1)</sup>.

والجدير بالذكر أنّ آلية التَّلَف المصاحبة لتحول الماء إلى جليد تكون أكثر إتلافاً عندما يتكرر حدوث عملية التَّجمد والذَّوبان بشكل دوري وشديد، إذ تفقد الحجارة خلالها جودة خواصها الفيزيائية والميكانيكية بشكل تدريجي، مما يضعف صلابتها وبالتالي ديموميتها، وهذا ما ينعكس سلباً على سلامة الآثار المتشكلة منها.



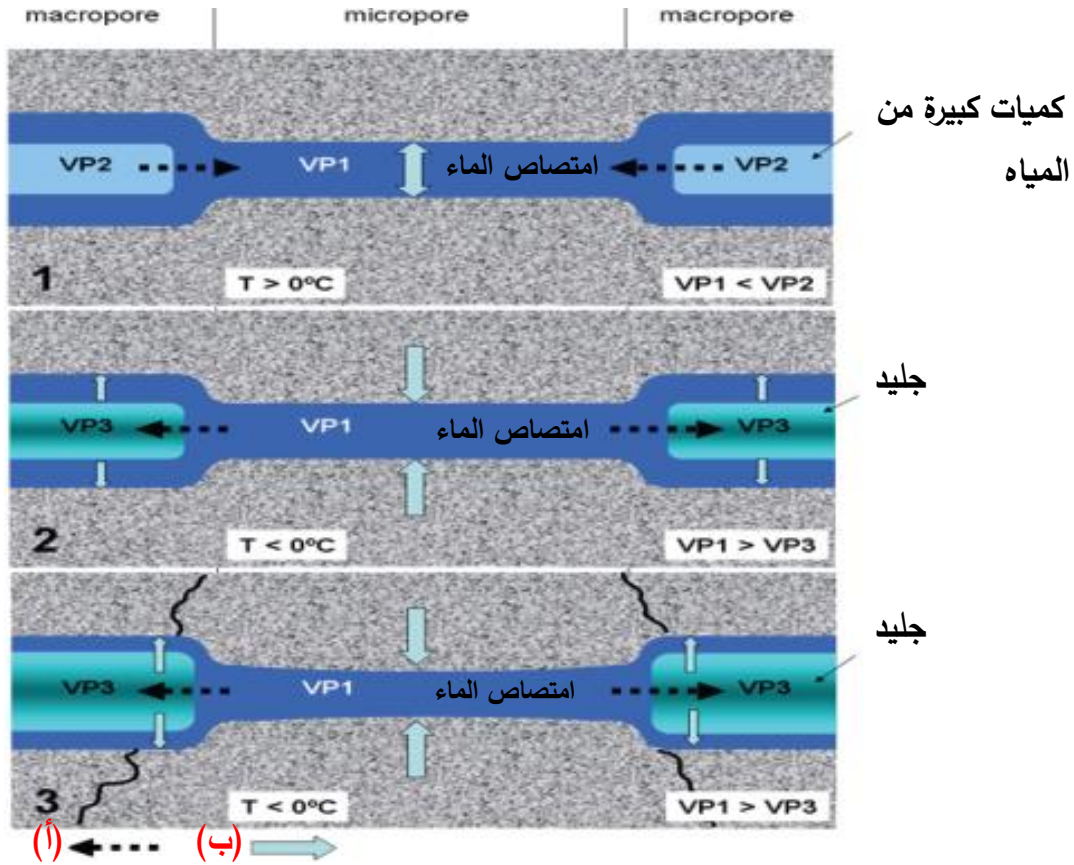
الشكل رقم 31: يوضح عملية نمو الجليد داخل المسام، أ: طرد الماء من شبكة المسام، ب: تشكّل شريط الماء غير المتجمّد بين جدران المسام والجليد الذي يخلق ظاهرة الإمتصاص، اتجاه هجرة الماء غير المتجمد تكون عكسية من الداخل نحو الخارج<sup>(2)</sup>.

(1) - Charlotte Walbert, Op.cit, p 16.

(2) - Ibid, p 1

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجرة

نستخلص مما سبق أنّ الماء المتواجدة في المسام الكبيرة هو من يتحول أولاً إلى جليد بينما المتواجدة في المسام الأصغر منها يبقى سائلاً، ويرافق هذا التّحول زيادة في الحجم تصل إلى 9,1%، مما يولد ضغطاً هيدروليكية على الماء المتبقي سائلاً الشّكل رقم 32، ويؤدي أيضاً إلى اختلال في توازن المحلول بين الماء الموجود قرب جبهة الجليد وماء المسام الدّقيقة، وللتّخفيف من حدّة اختلال التّوازن (Thermodynamique) الحراري الدّيناميكي في شبكة المسامية يهاجر الماء الذي لا يزال سائلاً إلى جبهة الجليد عندما تجد مساحة كافية كما يظهر في الحالة رقم 2 (الشّكل رقم 32)، وإذا لم يجد الجليد الإضافي مساحة للهروب، عندها تتضرر جدران المسام وتتشقّق كما يظهر في الحالة رقم 3 (الشّكل رقم 32).



الشّكل رقم 32: رسم تخطيطي يبين تدهور مسام الحجرة عن طريق الضّغط الأسموزي

(VP1، VP2، VP3) ضغّط بخار الماء الممتص والماء والجليد على التّوالي،

1- التدفق الأسموزي للمياه من المسام الكبيرة للمسام الدّقيقة في درجة حرارة  $T < 0^\circ\text{C}$

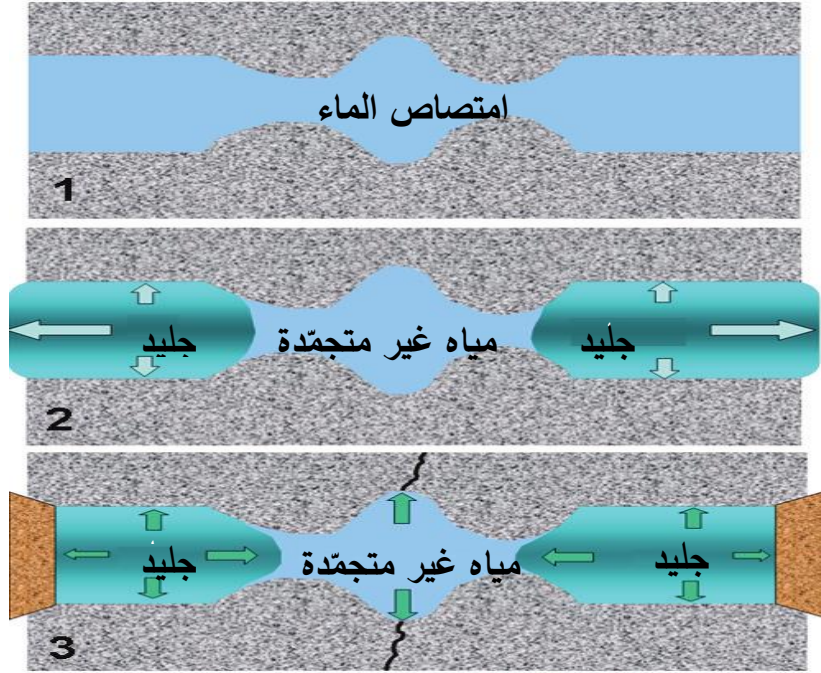
2- التدفق الأسموزي للمياه الممتصة من المسام الكبيرة للمسام الدّقيقة مع الجليد في درجة حرارة  $T > 0^\circ\text{C}$

3- الحجرة متدهورة بسبب الضّغط الأسموزي (أ) اتجاه حركة جزيء الماء، (ب) اتجاه الضّغط<sup>(1)</sup>.

(1)- Ibid ,pp79-88.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجاره

أما الضغوط الهيدروليكية فتحدث نتيجة مقاومة نزوح الماء فائق البرودة من المسام الدقيقة، أو بسبب الإختلاف في الضغط الأسموزي بسبب تقدم جبهة الجليد، فضلاً عن انسداد المسام مما يضاعف هذه الضغوط، وعندما تتجاوز أحد هذه الضغوط الهيدروليكية أو الأسموزية أو كلاهما معاً مقاومة تحمل الحجاره تتشكّل عندئذ تشققات في مختلف الإتجاهات على المستوى المجهرى كما هو مبين في الشكل رقم 33.



الشكل رقم 33: يبين التدهور الذي يحدث على مستوى مسام الحجاره بفعل الضغط الهيدروليكي:  
1- الماء بكميات كبيرة في المسام الكبيرة، 2- الماء المتجمد في المسام الكبيرة المفتوحة،  
3 - انغلاق كلي للمسام التي تضررت بفعل الماء المتجمد<sup>(1)</sup>

ويمكن خطر هذه التشققات في إمكانية انتشارها وتوسّعها مع تكرار دورات التجمد والذوبان، مما تتسبب في اضعاف البنية الداخلية للحجاره بشكل تدريجي لتستسلم في النهاية للتشقق والتصدع والانفلاق، ونظراً لتعدد الظروف المتدخلة في تشكّل الجليد، وفي هذا السياق يرى Charlotte Walbert<sup>(2)</sup> أنّ آلية التدهور الناجمة عن تشكّل الجليد في الوسط المسامي لم تعتمد نهائياً، ولا تزال محل دراسة لحد اليوم، لأنّه من الصعب تقدير فعل الضغوط الهيدروليكية بسبب الصراع بين حركة هجرة الماء وجبهة الجليد.

(1)-Martin ondrášik, miloslav kopecký, rock pore structure As main reason of rock deterioration, studia geotechnica et mechanica, Vol. XXXVI, No. 1, 2014 pp 79-88.

(2) - Charlotte Walbert, Op.cit, p17.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

وبما أنّ الضغوط الشعيرية تقوم على عدم تجانس الشبكة المسامية، لذا من الضروري الأخذ بعين الاعتبار مدة وسرعة التجمد، لأنهما يمكن أن يؤثران بشكل كبير على آلية تدهور الحجارة، فعلى سبيل المثال التجمد السريع يحد من مدة هجرة الماء غير المتجمد في شبكة المسامية، مما يتولد عنه ضغوط كبيرة قد تؤدي إلى تدهور سطحي للحجارة أو انفلاقها، أما في حالة التجمد البطيء يمتلك حينها الماء غير المتجمد الوقت الكافي للتحرك والتثقل إلى قلب الحجارة، وبذلك يتغلغل الجليد في عمق الحجارة.

### IV- مظاهر تلف الحجارة بفعل الجليد

ووفق العديد من الدراسات فإن مظاهر تلف الحجارة بفعل الجليد تأخذ أشكالاً متعددة حسب صلابة الحجارة، وشدة ومدة وعدد دورات الجليد، وبشكل عام يمكن حصرها في نوعين من الأضرار لا يتبعان نفس الآلية ولا يظهران في نفس الوقت ولا على نفس الحجارة، وهي عبارة عن مزيج من التلف الداخلي والخارجي.

### 1-IV - التلف الداخلي

يتجلى التدهور الداخلي في تكوين شروخ وشقوق دقيقة داخلية ذات اتجاهات مختلفة، والتي يمكن أن تتطور وتمس كامل جسم الحجارة، فضلاً عن ذلك، فهذه التشققات تؤدي إلى الحد من خواص الفيزيوميكانيكية للحجارة بشكل تدريجي مما يفقدها تماسكها وصلابتها الأمر الذي ينعكس سلباً على ديمومتها<sup>(1)</sup>.

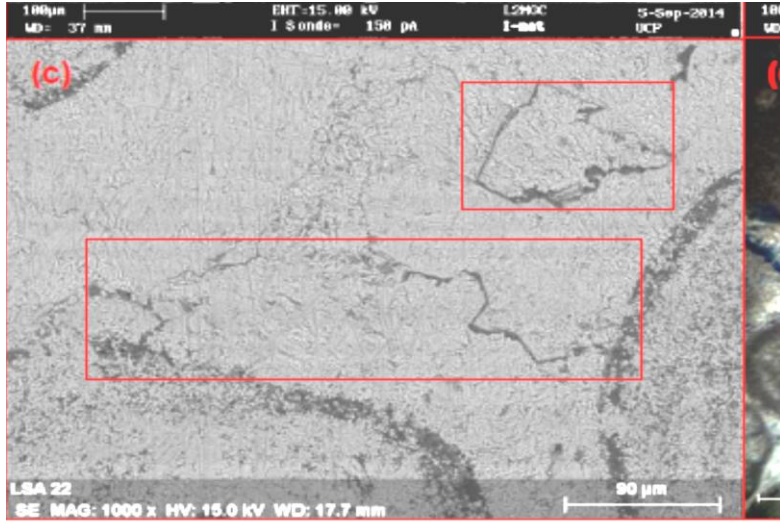
في حين شدة الشقّ وحجمه يرتبط بشدة ومدة وعدد وتسارع وتكرار دورات التجمد والذوبان (درجات الحرارة الدنيا والقصى، درجة التثبع، ومدة الجليد)، لذا فالعمق الذي يصل إليه الجليد في الحجارة ليس هو نفسه، فضلاً عن ذلك، فأصل الضغوط المتولدة يختلف حسب درجة صلابة الحجارة، وقد تكون الشقوق المتكونة ذات أصل ميكانيكي مرتبط بتوسع الجليد، أو ذات أصل Thermo-hydrique حرماي مرتبط بالتعب الحراري<sup>(2)</sup>، تكون هذه الشقوق مجهرية (الصورة رقم 76)، وقد تكون على حدود الحبيبات كما مبين في الشكل (رقم 34)، وتتشكل هذه الشقوق نتيجة وجود تدرج حراري بين سطح الحجارة وداخلها.

(1)-Sébastien bouteille, outils de caractérisation et analyse du comportement des matériaux cimentaires soumis à des cycles de gel-dégel en présence de sels, thèses de doctorat, université Paris-est, France, 2013,P 36.

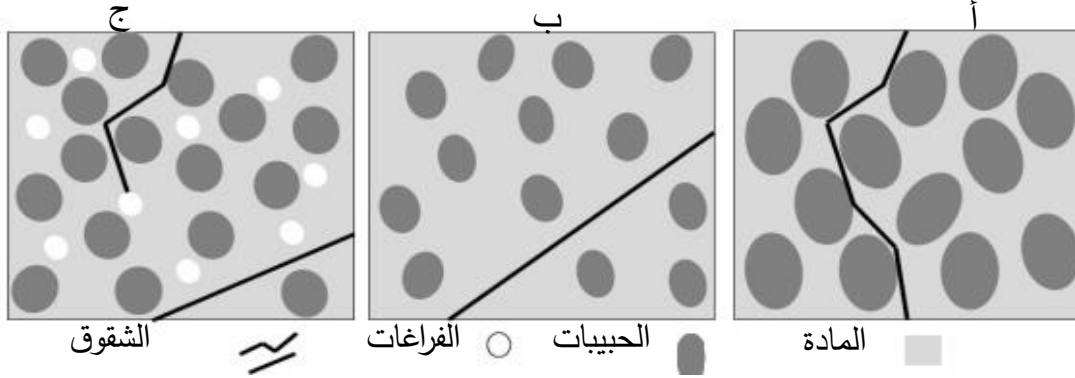
(2) - Marion Bost, Op.cit, p76.



## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة



الصورة رقم 76: صور مجهرية تبين تشكّل شقوق مجهرية في البنية الداخلية للحجارة<sup>(1)</sup>.



الشكل رقم 34: يبين انتشار الشقوق داخل البنية المجهرية للحجارة، أ-انتشار التشققات بين الحبيبات، ب: تشققات على مستوى مصفوفة الحجارة، ج: تشققات على مستوى الحبيبات<sup>(2)</sup>

### IV-2- التآكل الخارجي

يسبب الجليد أضراراً خارجيةً للحجارة بشكل تؤثر سلباً على سلامة واستقرار وديمومة البناء الأثري المتشكل منها، وفيما يلي نلخص أبرز الأضرار الخارجية التي تعز للجليد:

### IV-2-1- تقشر الحجارة

التقشر، كما يوحي اسمه، هو نمط تدهور يؤثر بشكل خاص على الأسطح التي في اتصال مباشر مع البيئة الخارجية، وهو أكثر مظاهر التآكل انتشاراً على حجارة الهياكل المعرضة لدورات التجمد والذوبان، ويتجلى هذا التدهور في التشرخ والتمزق والانفصال على شكل شظايا صغيرة على مستوى مناطق ضعف الحجارة مثل الطبقات

(1) - Charlotte Walbert, Op.cit. p128.

(2) - Ibid, p129.



## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

والشقوق، والتي تكون موضعية تتركز بمجرد بدأ الانفصال لتنتشر على كامل السطح وقد تمتد في العمق<sup>(1)</sup>، ويرتبط التقشر بظاهرة شفق البرودة التي تؤدي إلى هجرة المياه غير المتجمدة نحو جبهة الجليد مما يساهم في تكوين جليد إضافي على محيط الجزء المتقشر<sup>(2)</sup>.

أما آلية تشكّل الشقوق فترجع للضغوط الهيدروليكية والأسموزية المتولدة بفعل دورات تجمّد وذوبان الماء، وقد لا تؤثر هذه الشقوق بشكل فوري، لكن بمرور الزمن تتسع وتنتشر مما تُسبّب أضراراً بالغة تُضعف هيكل البناء، ويلاحظ هذا التدهور في المداميك العلوية للمسرح (الصور رقم 77)، والمداميك السفلى للمعبد السيفيري الصورة رقم 78.



الصورة رقم 77: نقش حجارة المداميك العلوية للمسرح بفعل الجليد  
الصورة رقم 78: نقش حجارة المعبد السفلى بفعل دورات التجمّد والذوبان

### IV-2-2- الإنفصام

يحدث انفصام الحجارة بفعل الجليد نتيجة استغلاله للشقوق والقواصل والطبقات، والتي تعد بمثابة نقاط ضعف مفضلة لعمل الجليد، إذ تتناسب كثافة الجليد عكسياً مع توسع الشقوق، بمعنى كلما كانت الشقوق دقيقة كلما إزدادت كثافة الجليد، وبما أنّ الشقوق والطبقات تعتبر مستويات ضعف والتي غالباً ما تكون أبعادها أكبر من المسام، ونظراً لكبر حجمها وضعف مقاومتها الميكانيكية، فيمكن أن تشكّل نوعاً من النظام المفتوح في الحجارة كما هو موضح في الشكل رقم 28، حيث يكون الجليد قادراً على التجمع والنمو والانتشار على طول الشق بدلاً من الدخول من جديد في المسام<sup>(3)</sup>.

(1)- L'ifstar, diagnostic de la géivité d'un béton, novembre 2017,p1.

(2)-Céline Thomachot, Op.cit p67.

(3)-Céline Thomachot, Op.cit p67.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

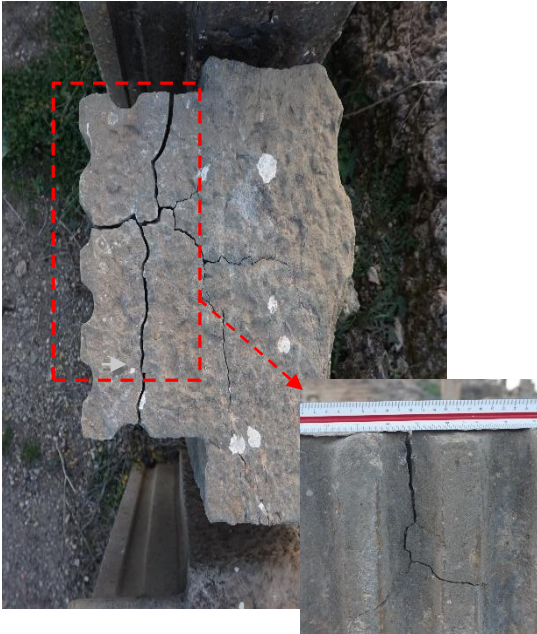
وبشكل عام يؤدي الجليد إلى تشقق وانفصال وتجزؤ الحجارة على مستوى المداميك العليا و/أو السفلى كما يظهر في على مستوى المداميك السفلى للمسرح الصورة رقم (79)، وقاعدة قوس كركلا (الصورة رقم 80)، وأيضاً يلاحظ انفصام عمود بالحمامات الملحقة بالمعمودية (الصور رقم 81)، وتشقق الحجارة من الجهة العلوية بالحي الوثني (الصور رقم 82).



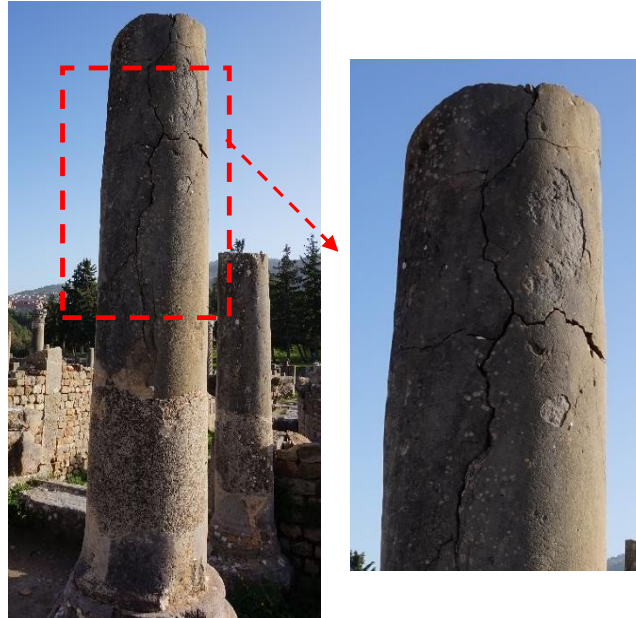
الصورة رقم 80: تبيين تشقق وانفصال بفعل الجليد بقاعدة قوس كركلا



الصورة رقم 79: تبيين التشقق والانفصال والتجزؤ بفعل الجليد على مستوى المسرح



الصورة رقم 82: تشقق كتل حجرية بمبنى بالحي الوثني



الصورة رقم 81: تبيين انتشار الشقوق بعمود بفعل الجليد بالحمامات الملحقة بالمعمودية



## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

### IV-3-2- إنفلاق الحجارة ECLATEMENT

يرتبط انفلاق الحجارة بتشكّل الجليد داخلها، إذ تحدث هذه الآلية نتيجة الإنخفاض السريع لدرجات الحرارة لأقل من 0°م، والتي تسمح بتجمّد أكبر كمية من الماء في فترة زمنية قصيرة جداً، مما يؤدي إلى تشكل منطقة مسدودة «zone de blocage» بسبب هجرة المياه غير المتجمّدة التي تضغط عليها جبهة الجليد المتقدمة (1)، بمعنى تولد ضغوط هيدروليكية وأسموزية كبيرة جداً في منطقة مغلقة في قلب الحجارة، مما يؤدي إلى انفلاقها لتحرر تلك الضغوط، وتكون هذه الظاهرة مفضلة في حالة التشعب الكبير مع نفاذية منخفضة حتى وإن كان الجليد بطيء ودرجة الحرارة الأدنى مرتفعة.

نستخلص مما سبق أن الأضرار التي تصيب الحجارة الناجمة عن الجليد هي عبارة عن مزيج من الأضرار الداخلية والخارجية، يتجلى التآكل الداخلي في الشقوق والشروخ الدقيقة الداخلية، والتي ينتج عنها تناقص مقاومتها الميكانيكية وارتفاع من مساميتها ونفاذيتها وتشعبها، أما الأضرار الخارجية فتتمثل في التقشر السطحي، والتشقق والانفصال، فضلاً عن انفلاق الحجارة، بالإضافة إلى التدهور الجمالي، وفقدان ما تحمله من نقوش وكتابات وزخارف، ويزداد خطر الجليد مع تكرار دورات التجمد والذوبان، مما يؤدي إلى زيادة في نفاذية السطح فضلاً عن التناقص التدريجي في سمك الطبقات الخارجية للحجارة، مما يعزز من تآكل أسطحها، وتشققها وانفلاقها وبالتالي فقدان الآثار المتشكلة منها نهائياً.

### IV-3- التآثيرات الميكانيكية للجليد

مما لا شك أنّ العمليات المعقدة التي ترافق الظواهر الميكانيكية المصاحبة لتشكّل الجليد هي أصل الأضرار التي تلحق بالحجارة، فالتّمدد الذي يرافق تجمّد الماء يسدّ تدريجياً مسارات تنقل السوائل، مما يولد ضغوطاً موضعيةً متزايدة في فضاء المسام تكون السبب الرئيسي في التدهور المرتبط بالجليد (2)، في حين عملية ذوبان الجليد يرافقه تلاشي الضغوط على المسام غير أنّه يرفع من تشعب الحجارة مما يسمح بتشكيل جليد إضافي، وعند تكرار عملية تجمد وذوبان الجليد يؤدي إلى زيادة حجم المسام، و/أو تشكل شقوق جديد، أو توسع تلك الموجودة أو الموروثة سابقاً، وهذا ما يضعف الحجارة .

(1)-Céline Thomachot, Op.cit ,p67.

(2)-Jean-François Daïan , Op.cit ,p61.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجاره

بالإضافة إلى ذلك، فالزيادة في الحجم الناتجة عن تحول الماء من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة (الجليد) يولد ضغوطاً داخلية شديدة تكفي لإحداث شقوق متفاوتة في البنية الداخلية للحجاره، ومما لا شكّ فإنّ الفعل الإتلافي للجليد يتضاعف عند توفر الماء أثناء تشكّل الجليد نتيجة زيادة كثافة هذا الأخير.

أما بخصوص المقاومة الميكانيكية للحجاره فهي لا تؤثر على عملية تشكّل الجليد، لكنها تحدّد من قدرة الحجاره على الصمود في وجه الضغوط المتزايدة، لذا يفضل أن تكون مقاومتها الميكانيكية أكبر من الضغوط المتولدة، وهذا وفق Charlotte Walbert<sup>(1)</sup>، في حين Marion Bost يشير إلى أنّه لا ينبغي إهمال فقدان الحجاره لمقاومتها الميكانيكية عقب كل دورة من دورات التجمّد، والتي قد لا تسمح بحالتها بتحمل الضغوط المتزايدة<sup>(2)</sup>.

نستخلص مما سبق أنّ المقاومة الميكانيكية للحجاره لا تؤثر على تشكّل الجليد، لكنها تعدّ عاملاً مهماً في تحديد قدرة الحجاره على مقاومة أو تحمل الضغوط المتولدة دورات التجمّد والذوبان، وتكون الحجاره في خطر كبير إذا كانت تمتلك في الأصل خواص ميكانيكية ضعيفة، و/أو خواص فيزيائية غير جيدة (مسامية مرتفعة، كثافة منخفضة، امتصاص وتشبع مرتفع)، إذ تتناقص جودة هذه الخواص الفيزيائية والميكانيكية مع تكرار دورات التجمّد والذوبان، مما يساهم في إضعاف صلابه ومقاومة الحجاره مما يعرضها لخطر الإندثار، لذا يستحسن أن تمتلك الحجاره مقاومة ميكانيكية أولية وخواص فيزيائية جيدة، أما إذا كان العكس فيجب العمل على رفع جودة خواصها ومقاومتها الميكانيكية.

### ٧-العوامل المؤثرة في تدهور الحجاره بفعل الجليد

تتعمد عملية تلف الحجاره بفعل دورات التجمّد والذوبان على عدة عوامل، يمكن إجمالها في عوامل داخلية وعوامل خارجية:

#### ١-٧-العوامل الداخلية للحجاره

لا شكّ أن طبيعة الخواص الجوهرية للحجاره تلعب دوراً كبيراً في تحديد سلوكها ودرجة مقاومتها لآليات التلف المصاحبة لتشكّل الجليد وذوبانه، ويمكن إجمال أهم هذه الخواص فيما يلي:

(1)-Charlotte Walbert, Op.cit ,p19

(2) -Marion Bost, Op.cit , p66

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

### 1-1-V-1- نسيج الحجارة

يؤثر نسيج الحجارة بشكل مباشر على عملية التجمد، من خلال تحكمه في هجرة وتوزيع وتخزين الماء، وبالتالي في درجة تشبعها، بالإضافة إلى تحكمه في قدرة الحجارة على استعادة شحنها للماء أثناء أو بين فترات التجمد<sup>(1)</sup>.

وقد أوضحت الدراسة التي قام بها (Akos Török و Zita Pápay، 2017)<sup>(2)</sup> أنّ الاختلاف في نسيج الحجارة الكلسية يؤثر بشكل كبير على صلابتها ومتانتها، كما بينت أنّ العينات من نوع grainstone bioclastique لديها مقاومة جيدة للفعل السلبي والإتلافي للجليد، في حين الحجارة من نوع packstone bioclastique لديها مقاومة ضعيفة.

### 1-1-V-2- بنية الوسط المسامي للحجارة

تعتمد مقاومة الحجارة للجليد في المقام الأول على بنية وسطها المسامي، والذي يرتبط بشكل وحجم المسامات ومدى اتصالها ببعضها البعض، وعلى مدى امتلاء هذه المسام بالماء والإحتفاظ به، وعلى نسبة الماء القادر على التتوي، وهذا كله مرتبط بالوقت اللازم لملء المسام بالماء للدرجة الحرجة، فضلاً عن ذلك، فخصائص المسام تحدد كمية الماء (درجة تشبع الحجارة)، ودرجة الحرارة التي يتحول عندها هذا الماء إلى جليد، بمعنى أنّ درجة حرارة تجمد الماء في الحجارة تعتمد أساساً على حجم المسام، حيث يتوافق كل من حجم المسام ودرجة الحرارة وكمية الجليد المتكون، وبالتالي فالأضرار الناتجة عن الجليد تزداد مع زيادة نسبة المسام الكبيرة المتصلة ببعضها<sup>(3)</sup>.

كما يلعب تشبع الحجارة دوراً كبيراً في تلفها بفعل الجليد، وهذا ما أكدته Zbigniew Rusina<sup>(4)</sup> بأن تلف الحجارة يبدأ عندما تتعدى درجة تشبعها المستوى الحرج، وعندما يتجاوز الجليد المتشكل حجم المسام المتاح، كما أنّه قد يحدث التدهور في دورات التجمد الأولى، أو بعد عدة دورات وذلك حسب صلابة الحجارة.

(1) -Ibid ,p 65

(2) Zita Pápay, Ákos Török, Effect of Thermal and Freeze-thaw Stress on the Mechanical Properties of Porous limestone, periodica polytechnica civil engineering, 62(2) , 2018, pp 423-428.

(3) -Antonin Fabbri, Op.cit ,p9

(4) -Zbigniew Rusina, Przemysław Świercza, Zdzisława Owsiańska, Effect of microstructure on frost durability of rock in the context of diagnostic needs, procedia engineering 108, akielce University of Technology Poland, 2015, pp 177 – 184



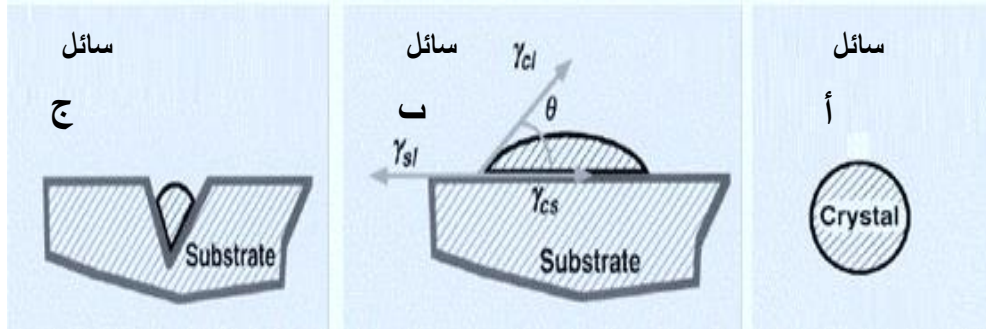
## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

### 3-1-V- خاصية نقل السوائل

تمثل خاصية نقل السوائل قدرة الحجارة على التشبع والسماح للسوائل باجتيازها، والتي تتحدد من جهة بالخاصية الشعيرية، فإذا كان معامل الإرتفاع الشعيري كبيراً فإنه يسمح للحجارة بامتلاك مصدر للماء بشكل منتظم خلال دورات التجمد، وهذا ما يضاعف من التدهور، ومن جهة أخرى ترتبط بخاصية النفاذية، فإذا كانت للحجارة نفاذية منخفضة وتعرضت لموجة جليد سريع، تزداد عندئذ الضغوط الهيدروليكية المتولدة، أما إذا تعرضت للجليد لفترة طويلة، فتعمل النفاذية المنخفضة عندئذ على الحد من ظاهرة الشفط البرودة<sup>(1)</sup>، وإذا كانت النفاذية عالية لكن مع تجمد بطيء، تتسبب في فقدان التشبع بشكل سريع، وقد يتم عندها قذف الجليد من المسام، وعليه تكون النفاذية عامل مهم في خفض شدة الضغوط<sup>(2)</sup>.

### 4-1-V- البنية الهيكلية للحجارة

يستغل الجليد مناطق الضعف المنتشرة في الكتل الحجرية والموروثة من التعديلات السابقة، وهذا ما أكدته Charlotte Walbert<sup>(3)</sup> بأن العيوب الموجودة في بنية الحجارة تؤثر على عملية التجمد على مستوى تشكّل النوى ومدى تجانسها (الشكل رقم 35)، فعلى سبيل المثال التنوي المتجانس يتطلب وجود سائل نقي، وهو يحدث عند زاوية اتصال ( $\theta$ ) بين البلورة والطبقة السفلية (Substrat) أي جدران المسام أو الشوائب، وتتمثل عيوب البنية المجهرية في الشقوق والتجاويف، والفتحات وغيرها من الإنقطاعات والتي تكون مفضلة من طرف التنوي المتجانس، كونها تسمح بالحد الأقصى من الإتصال بين سطح الحجارة والجليد.



الشكل رقم 35: تنوي بلورات الجليد: (أ) تنوي متجانس، (ب) تنوي غير متجانس، (ج) تنوي متجانس في حالة وجود عيوب<sup>(4)</sup>

(1) - Charlotte Walbert, Op.cit, pp18,19.

(2) - Marion Bost, Op.cit, pp 64,65

(3) -Charlotte Walbert, Op.cit ,p19.

(4) -Ibid ,p,19

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

فضلاً عن ذلك، فحالة حفظ سطح الحجارة تلعب دوراً كبيراً في تعزيز فعل الجليد، فاحتواءه على عيوب وشقوق وتجاويف تعزز وتحفز وتضاعف من التقشر الذي هو عبارة عن ظاهرة موضعية تحدث بشكل كبير بالقرب من العيوب السطحية التي تحدثها التجاويف وانفصال الحبيبات (1).

### 1-V-5- الخواص الميكانيكية

تعتمد الخواص الميكانيكية للحجارة المتمثلة في مقاومة الضّغط والشّد على تكوينها المعدني وبنيتها المسامية، لذا يفضل أن تمتلك تكويناً معدنياً صلباً ومواد رابطة صلبة ومتجانسة مع مسامية منخفضة، أما تدهور الحجارة بفعل الجليد فيحدث إذا تجاوزت الضّغوط المتولد قدرة تحمل أو مقاومة الحجارة للضّغط أو الشّد.

فضلاً عن ذلك، فدورات التّجمد والذّوبان تحفز أولاً تشقق الحجارة التي تملك صلابة وتماسكاً ضعيفاً أو متوسطاً مع مسامية مرتفعة ومقاومة للضّغط والشّد متدنية، أما الحجارة المتماسكة جيداً وذات مسامية منخفضة ومقاومة للشّد والضّغط كبيرة فهي لا تتأثر بشكل أسرع إلا إذا تعرضت لعدد كبير من دورات التّجمد والذّوبان، أو التي فقدت بشكل جزئي أو كلي الخواص التي تمنحها الصّلابة والمتانة.

### 2-V-2- العوامل الخارجية

تتمثل العوامل الخارجية أساساً في الظروف المناخية وإمدادات الماء، والتي تتحكم بشكل كبير في ظروف تشكّل الجليد، وشدّته ومدته، فضلاً عن مقاومة الحجارة للجليد.

### 1-2-V-2- درجة الحرارة

تؤدي التّغيرات في درجة الحرارة اليومية والموسمية بشكل كبير إلى توليد مجالات إجهاد كبيرة، فضلاً عن زيادة شدّة الضّغوط الناتجة عن التّجمد (2)، كما أنّ هناك علاقة عكسية بين درجة الحرارة وشدّة الضّغوط المتولدة، حيث كلما انخفضت درجة الحرارة كلما زادت شدّة الضّغوط المتولدة لتصل إلى مرحلة حرجة التي عندها تفقد الحجارة مقاومتها وتستسلم للتّغير والتّدهور، فعلى سبيل المثال عند انخفاض درجة حرارة الحجارة إلى ما دون

(1) - Antonin Fabbri, op cit ,p9

(2)- Rouques Gilles, Caniard loic, Gel et dégel des chaussées, note d'information technique, laboratoire central des ponts et chaussees (LCPC), Paris, 1975, p7.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

( $0^{\circ}\text{م}$ ) يمارس الجليد ضغطاً في حدود 6 كلغ/سم<sup>2</sup>، وعندما تنخفض إلى ( $-5^{\circ}\text{م}$ ) يبلغ الضَّغط عندها حوالي 610 كلغ/سم<sup>2</sup>، أما عندما تبلغ درجة الحرارة ( $-15^{\circ}\text{م}$ ) فيرتفع عندها الضَّغط إلى حدود 1590 كلغ/سم<sup>2</sup>، لكن حينما تنخفض درجة حرارة إلى ( $-20^{\circ}\text{م}$ ) عندئذٍ يبلغ الضَّغط المتولد أقصى قيمة له حيث يقدر بحوالي 2115 كلغ/سم<sup>2</sup>(1).

كما تتحكم درجة الحرارة في كثافة الجليد وفي مدة التَّجمد (الحدّ الأدنى من درجة الحرارة، وفي سرعة التَّبريد، وفي شدة التَّجمد والذُّوبان)، كما أنّ تشكُّل بلورات الجليد وانتشارها يتطلب زمناً وسرعةً معينة حتى تتمكن الماء الحرّ من التَّحرك نحو جبهة الجليد، مما يؤدي إلى توسُّع الجليد وتولد ضغوط متلفة للحجارة، وهذا ما بينه Marion Bost (2) بأنّ التَّجمد السَّريع يحول دون تشبع الحجارة ويولد ضغوط سريعة وشديدة قد تتسبب في انفلاق الحجارة، في حين التَّجمد الطويل مع ذوبان كبير يؤدي إلى تشكُّل جليد بأكثر كثافة وسماكة، وعندها يكون أشدّ إتلافاً، كون مدة مرحلة التَّجمد تلعب دوراً كبيراً في زيادة العمق الذي يمكن أن يصل إليه الجليد في عمق المسام، مما يضاعف من فعله الإتلافي، أما إذا كان الذُّوبان ضعيفاً وكانت مدة التَّجمد قصيرة يكون الجليد أقلّ تأثيراً.

ومما سبق نستخلص أنّ التَّغيرات في درجة الحرارة، سواء عند ارتفاعها أو انخفاضها، تعزز الفعل الإتلافي للجليد من خلال تحفيز تعاقب وتكرار دورات التَّجمد والذُّوبان بشكل يؤدي إلى إضعاف مقاومة الحجارة تدريجياً إلى أنّ تصل إلى المرحلة الحرجة التي عندها تنهار مقاومة الحجارة وتستسلم للتشقُّق والتَّمزق والتَّصدع أو الانفلاق الكلي.

### V-2-2- محتوى الماء

وجود الماء في الوسط المسامي للحجارة يلعب دوراً مهماً في تشكيل بلورات الجليد، كما أنه يتحكم في شدة الفعل الإتلافي للجليد، فضلاً عن ذلك، فمحتوى الماء يتغيّر خلال عملية التَّجمد، وذلك حسب الظروف البيئية التي تتواجد فيها هذه الحجارة، لذا فظروف الحصول على مصدر للماء أثناء دورات التَّجمد والذُّوبان تعتبر أكثر أهمية من التَّشبع الأولي للحجارة، كونه يزيد من حجم الماء في مسامها، مما يضاعف من فعل الجليد الإتلافي(3).

(1)-Wieslaw Domaslowski, Opcit, p35.

(2) - Marion Bost, Op.cit ,p 66

(3) -Ibid, pp, 66,78

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

وقد أشار Wieslaw Domaslawski<sup>(1)</sup> أن الفعل الإلتلافي للماء على الحجارة يعتمد على حجم وشكل مسامها وعلاقتها المتبادلة بنشبعها، بمعنى على درجة ملء المسام بالماء، ومن جهة أخرى على شدة ومدة وتكرار دورات التجمد والذوبان (التغيرات في درجة الحرارة)، والزيادة في الحجم، ولكي يتولد ضغط على جدران المسام يجب أن يمتلئ حجمها بالماء بنسبة من 87 إلى 91 %، وأشد تدهور يحدث عندما يمتلئ هذه المسام بنسبة 100 %، لأن الزيادة في الحجم تؤدي إلى توليد أقصى ضغوط على المسام، وهذا ما يجهد البنية الداخلية للحجارة ويضعفها، الأمر ينعكس سلباً على صلابة الحجارة ومقاومتها وبالتالي ديمومتها، وهذا ما أكدته Céline Thomachot بأن التأثير السلبي للجليد على الحجارة يعتمد جزئياً على درجة تشبعها<sup>(2)</sup>.

كما لا ينبغي إهمال دور الرطوبة والتساقط (الأمطار، الثلوج) والتكاثف في تعزيز عملية تجمد الحجارة، كونها تعد من مصادر الماء الرئيسية، إذ أن تأثير الجليد على الحجارة لا يقتصر فقط على طول فترة التجمد، بل أيضاً على درجة تشبعها (كلي أو جزئي) والتي ترتبط بدورها بطبيعة شبكة المسامية وخواص نقل السوائل، بالإضافة إلى الظروف البيئية التي تتواجد فيها، فعلى سبيل المثال الأجزاء المتواجدة في الظل تحتوي على نسبة ماء مرتفعة جداً، وذلك لقلّة تعرضها لأشعة الشمس، وبشكل عام تكون أضرار الجليد كبيرة جداً عندما تبلغ الرطوبة 90%<sup>(3)</sup>.

كما يساهم التساقط في تجمع وتسرب المياه عبر الشقوق والمسامات بشكل يوصل الحجارة إلى محتوى مائي كبير، وبذلك تكون في حالة حرجة عند تعرضها لنوبة جليد، فضلاً عن تعزيزه لتغلغل الماء في عمق الحجارة مما يضاعف من الضغوط الهيدروليكية و/أو الأسموزية المتولدة والتي قد تتلف وتضعف بينها الداخلية، وبشكل عام يمكن القول بأن تدهور الحجارة بفعل الجليد يحدث بشكل أساسي في المناطق الرطبة حيث تكون ظروف الشتاء شديدة (جليد شديد) وتكون أسطح الحجارة مشبعة بدرجات كبيرة بالماء ومؤهلة للتجمد بشكل متكرر.

(1) - Wieslaw Domaslawski, Op.cit, p35.

(2)- Céline Thomachot, Op.cit ,p 68.

(3)- Agerlund Göran ,Degré critique de saturation.Un outil pour l'estimation de la résistance au gel des matériaux de construction , Extrait de Matériaux et Constructions n° 23, V 4 ,Lund university ,1971,pp271-285.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

### 3-2-V- طبيعة الماء داخل المسامات

تتميز المياه المتسربة لمسامات وشقوق الحجارة بامتلاكها خواص تؤثر على عملية التجمد، إذ يمكن أن تصل كمية المياه المتجمدة في الشعيرية إلى 60% من المحتوى الكلي للماء، أما المياه المتواجدة في الشبكة فتصنف إلى ثلاثة أنواع<sup>(1)</sup>:

#### أ- الماء المستطرب (Eau hygroscopique)

يعد هذا النوع من الماء مقاوم جداً للجليد، حيث يكون داخل مسامات الحجارة على شكل شريط جُد رقيق، أحادي الجزيئات متصلة بروابط جزئية، كما يتميز بصعوبة انتقاله، ولا يمكن للمسام التخلص منه إلا بعد تحوله إلى الحالة الغازية.

#### ب- الماء الحر

يُعد بمثابة ماء طبيعي يتميز بسهولة تنقله داخل شبكة المسامية سواء في الحالة السائلة أو البخارية (تكاثف)، وهو يتجمد في درجة الحرارة قريبة من 0 °م.

#### ج- ماء الربط Eau d'adhésion

تختلف خواص هذا النوع من الماء عن تلك الموجودة في الماء الحر، فهو غير مرتبط بقوى فيزيائية وكيميائية، كما لديه وزن نوعي مرتفع جداً يتراوح من (1,3 إلى 2,4 غ/سم<sup>3</sup>)، ويكون في شكل حبيبات دقيقة ذات سمك لا يتعدى (0,1 μ)، تلتصق بقوة بجدران المسام، ومن أبرز ما تتميز به هذه النوع من الماء أن درجة حرارتها منخفضة جداً قد تصل إلى حدود (-78 °م).

### 4-2-V- تشبع الحجارة

لقد بينت العديد من الدراسات التي أجريت حول تأثير الجليد على الحجارة بأن الفعل السلبي للجليد يعتمد جزئياً على درجة تشبعها<sup>(2)</sup>، فلا يحدث تدهور كبير إلا إذا كانت مشبعة بالكامل أو قريبة من التشبع الكلي، وترتبط درجة تشبعها بكمية الماء ومدة التعرض، واتجاه التعرض، حيث نجد الأسطح المعرضة بشكل عمودي للأمطار تتشبع بشكل معتدل، في حين يحدث تشبع مرتفع للأسطح التي تتعرض بشكل أفقي لمصدر الماء<sup>(3)</sup>.

(1) - Wieslaw Domaslowski, Op.cit, p37.

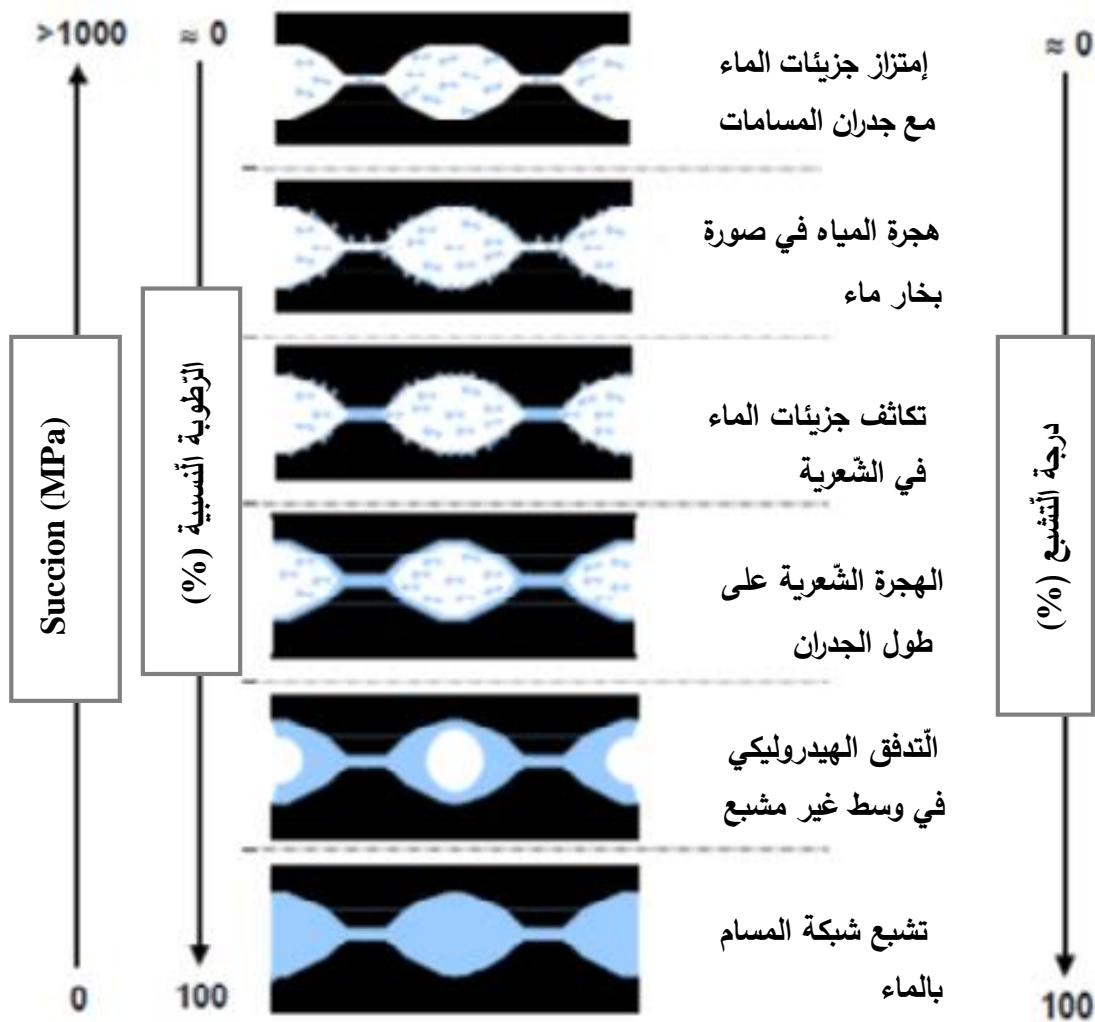
(2) - Céline Thomachot, Op.cit p68.

(3) -Baroghel-Bouny Véronique et all , Guide technique ,recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, france.2003, p14.



## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

ولا شك أنّ الحجارة تختلف في درجة تشبّعها، إذ تمتلك كل منها معامل تشبّع حرج خاص بها، فضلاً عن أنّها تمر بمراحل حتى تبلغ هذا التشبّع الحرج (الشكل رقم 36)، وهذا ما أكدته Charlotte Walbert<sup>(1)</sup> بأن الحجارة تتضرر بشكل كبير إذا تجاوزت درجة تشبّعها الحرج في دورة التجمد والذوبان، وفي حالة العكس تبقى سليمة، وتقدر نظرياً قيمة التشبّع الحرج بـ 91%، وقد خفضها Hirschwald إلى 80%، إلاّ أنّه توجد أنواع من الحجارة قد تتضرر عند 70%، والبعض الآخر قد يتعدى 80%، كما أوضح أيضاً أنّ خلال تجمّد الماء في المزهريات يمكن أن يقذف الجليد من الجزء المفتوح (الشكل رقم 37)، وبهذا يستخلص أن بعض الحجارة يمكنها أن تقذف الجليد من خلال مساماتها وشقوقها.

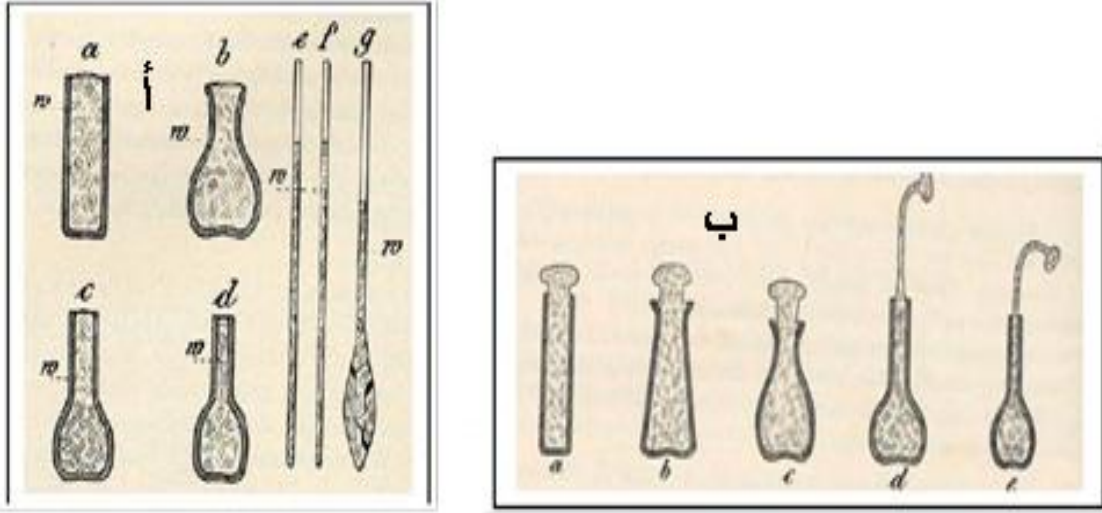


الشكل رقم 36: تمثيل توضيحي يبين المراحل المختلفة لتشبع المسامات بالماء (2)

(1) - Charlotte Walbert, Op.cit , p 17.

(2) -Kevin Beck, Op.cit. p93

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة



الشكل رقم 37: أشكال من أضرار الجليد، أ-تأثير المسام المتصلة بالشعرية،  
ب-قذف الجليد المتشكّل من خلال الفتحات (1).

كما يُعرف التّشبع الحرج ( $S_{Cr}$ ) بأنه نسبة التّشبع الأقصى التي يمكن للعيّنة بلوغها أثناء التّجمد دون أن تتدهور، وهي بدورها تحدد درجة مقاومتها الجليد ( $D_{Cr}$ )، ويمكن تقدير مقاومة مواد البناء للجليد بتطبيق العلاقة التّالية (2):

$$S_{Act} - S_{Cr} = (D_{Cr})$$

حيث  $S_{Act}$  هو تشبع المادة أثناء التّجمد.

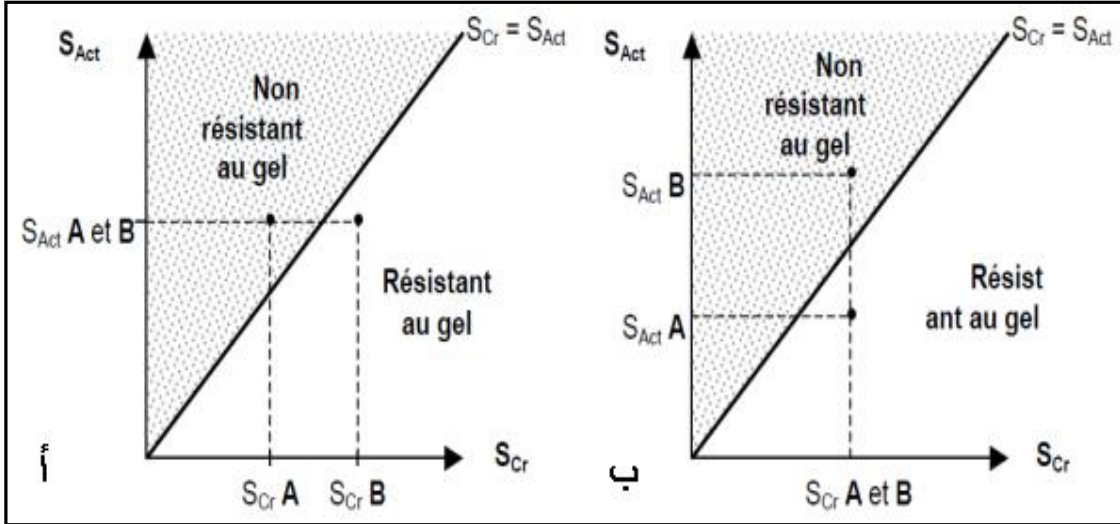
وقد تمتلك المادتين (أ و ب) نفس التّشبع أثناء التّجمد  $S_{Act}$ ، لكن مقاومتها للجليد تكون مختلفة وذلك حسب درجة تشبعهما الحرج  $S_{Cr}$  (الشكل رقم 38: أ)، وقد نجد عكس ذلك، كأن يكون للمادتين (أ و ب) نفس التّشبع الحرج لكن سلوكهما اتجاه الجليد يكون مختلفاً، وذلك تبعاً لحالة تشبعهما ومدة مرحلة التّجمد (الشكل رقم 38: ب).

وعليه يمكن القول بأنّ التّشبع الحرج هو ثابت وخاص بكل مادة، ويتم تحديده انطلاقاً من حجم المسامية المتصلة وكمية الماء المحتمل تجمّده، أما كمية الماء الذي لا يمكن تجمّده فيمكن تقييمه باستخدام مسعر الحرارة Calorimètre adiabatique.

(1) - Charlotte Walbert, Op.cit ,p18

(2) - Céline Thomachot, Op.cit,p68

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة



الشكل رقم 38: تحديد مقاومة الجليد انطلاقاً من درجة تشبع حرج محدد، أ-مادتين لهما نفس التشبع أثناء التجمد  $S_{Act}$  لكن مقاومتهما للجليد مختلفة وفق  $S_{Cr}$ . ب-مادتين لهما نفس التشبع الحرج  $S_{Cr}$  لكن سلوكهما مختلف اتجاه الجليد وفق درجة تشبعهما ومدة التجمد<sup>(1)</sup>.

### 6-2-V- حجم العينات

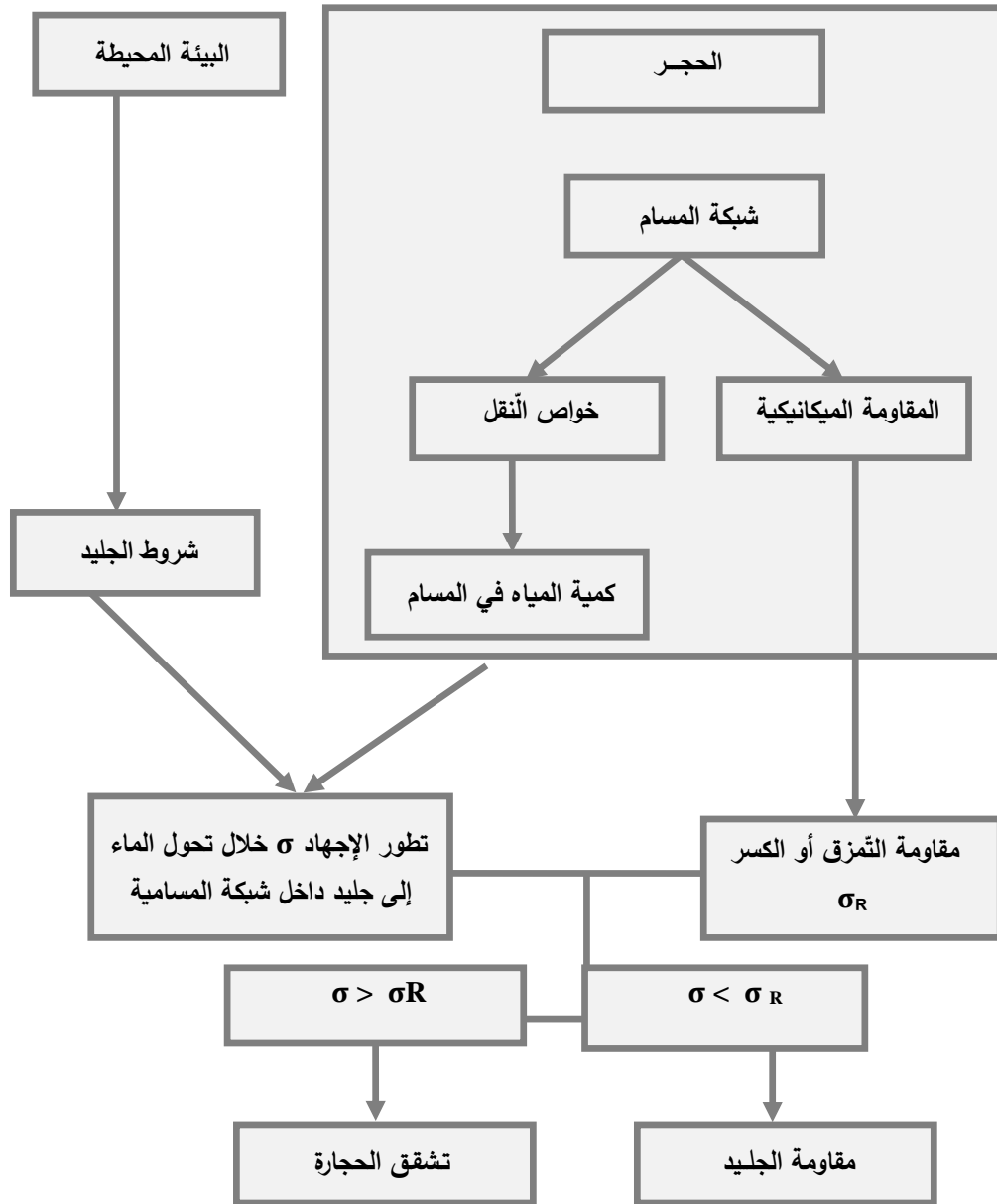
يرتبط تدهور الحجارة بفعل الجليد حسب حجمها وبشكل خاص بالمساحة المعرضة للجليد، بمعنى نسبة مساحة السطح المكشوف على الحجم الكلي للحجارة، هذه النسبة لا تعتمد فقط على حجم الحجارة ولكن أيضاً على الأبعاد الخطية للحجارة، وهذا ما أشار إليه Céline Thomachot<sup>(2)</sup> بأنّ السطح المكشوف عندما يكون صغيراً مقارنةً بالحجم الكلي للحجارة (شكل دائري) لا يتأثر بشكل كبير، لأن توسع الجليد و/أو انبثاقه يتم عرقلته نتيجة بعد المسافة بين سطح الحجارة ومركزها، وبما أنّ طبقات السطح الخارجي تتخضع درجة حرارتها بشكل أسرع من الطبقات الداخلية لذا فالمياه الغير المتجمدة في العمق يمكن أن يتم محاصرتها مما يولد ضغوطاً هيدروليكيةً متزايدةً، ومع ذلك يمكن أن تطول مدة انبثاق الجليد طالما أنّ الطبقات الداخلية للحجارة لم تتجمد بعد، وبالتالي يتناقص تأثير الجليد، وعليه يمكن القول بأن الحجارة كبيرة الحجم الرطبة والغير محمية تكون معرضة للتشقق والانقسام، بينما تظل سليمة إذا كانت مغطاة بمواد عازلة تحد من سرعة تشبعها وتبردها، كما أنّه كلما كانت مساحة سطح الحجارة أصغر مقارنة بحجمها (انخفاض  $S/V$ ) كلما زاد تدهورها.

(1) -Ibid, p69.

(2) - Ibi, p71

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

ومما سبق نستخلص أنّ عملية تلف الحجارة بفعل الجليد ترتبط بطبيعة خواصها الفيزيوميكانيكية، أي بطبيعة شبكتها المسامية وخاصة نقلها للسوائل ودرجة تشبّعها، بالإضافة إلى ظروف التجمّد، ويقصد بها الحد الأدنى من درجة الحرارة، وسرعة التبريد، أما الأعراض التي يسببها الجليد فتعتمد على دورات التجمّد والذوبان (الشدة، سرعة التبريد، العدد، المدة،...)، ويمكن تمثيل عملية تدهور الحجارة بفعل الجليد والعوامل المساهمة في تعزيزه في الشكل رقم 39.



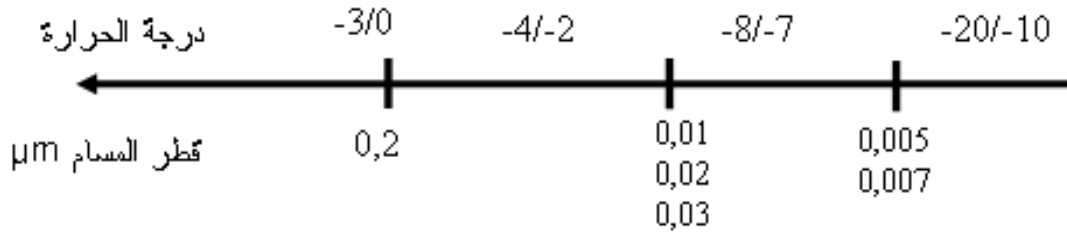
الشكل رقم 39: يبين التفاعل بين مختلف العوامل المؤثرة في تجمّد الحجارة (1)

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

### 3-V- العلاقة بين المسام وتشكل الجليد

تعتبر المسام وسطاً لتفاعل العديد من عوامل التلف، من بينها الجليد، إذ يتحكم حجم المسام في درجة تشبع الحجارة، وفي درجة حرارة التجمد في المسام، والضغوط المتولدة، ولقد أقيمت عدة دراسات هدفت لمعرفة العلاقة بين حجم المسام ودرجة حرارة التجمد، والتي في مجملها بينت إلى أنّ درجة حرارة تجمد الماء في المسام تنخفض كلما كان حجم المسام صغيراً، كما هو مبين في الشكل رقم 40.

ومن بين هذه الدراسات تلك التي قام بها Blachère 1972 م، والتي بينت أنّ المسام التي يتراوح قطرها بين (0,005 و 0,01  $\mu\text{m}$ ) يبدأ تشكل الجليد فيها عند درجة حرارة تتراوح بين (8- إلى -7 $^{\circ}\text{C}$ )، بينما المسام التي قطرها يتراوح بين (0,02 - 0,2) ميكرومتر ( $\mu\text{m}$ )، تكون درجة حرارة التجمد بين (-3 و 0 $^{\circ}\text{C}$ )، أما Tourenq 1970 فقد وجد أنّ المسام التي يقل قطرها عن 0,007  $\mu\text{m}$  يبدأ تجمدها عند درجة حرارة بين (-20 إلى -10 $^{\circ}\text{C}$ )، أما المسام التي قطرها يفوق 0,03  $\mu\text{m}$  فتكون درجة حرارة التجمد فيها بين (-4 و -2 $^{\circ}\text{C}$ )<sup>(1)</sup>.



الشكل رقم 40: درجة حرارة التجمد بدلالة قطر المسام (2)

كما تتحكم المسام في شدة الضغوط المتشكلة، والذي بدوره يخفض من نقطة التجمد، حيث في المسام الدقيقة تعمل قوى التوتر السطحي على خفض درجة حرارة تجمد الماء بالإرتباط بقطر المسام، ويتم التعبير عن هذه العملية بالعلاقة التالية (3):

$$T_c = T_0 \exp\left(\frac{Q.r}{d\sigma.v_E}\right)$$

(1) - Charlotte walbert, Op.cit ,p15

(2) -Ibid ,p15.

(3) -Céline Thomachot, Op cit, p58.



## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

حيث TC : درجة حرارة تجمّد الماء في مسام نصف قطرها R ب (K)

$T_0$ : درجة حرارة تجمّد الماء الحر (k)

Q: الطاقة الحرارية لذوبان الجليد (J.mol)

r : نصف قطر مسام (ميكرون  $\mu\text{m}$ )

$D_\sigma$  : الإختلاف في الطاقات السطحية للمياه والجليد (في N.m)

$U_E$  : حجم المولي للجليد ( $\text{cm}^3.\text{mol}$ )، عند  $0^\circ\text{C}$   $19.6383 \text{ cm}^3.\text{mol}$

### VI- المناهج التجريبية المختلفة لدراسة تأثير دورات التجمد والذوبان على الحجارة

منذ القرن الماضي، كان تدهور الصّخور أو حجارة البناء بفعل الجليد محل العديد من الدّراسات التجريبية، نلخص أهمها في الجدول رقم 16، ويكمن الهدف من هذه الإختبارات هو إلقاء الصّوء على خصائص قابلية الصّخور للتجمد، أو لإنشاء نموذج للتجوية، ومنها ما تهدف لتحديد الإختلافات في درجة الحرارة داخل الكتل الحجرية، أو لدراسة تطور تشبع الحجارة خلال عملية التجمد، أو لدراسة هجرة الماء داخل الحجارة خلال دورات التجمد والذوبان، أو لفهم آليات التآلف المرتبطة بالجليد، أو رصد الأضرار التي تلحق بحجارة معينة تخضع لظروف مناخية خاصة، أو للتحقق من أهمية خاصية ما في التآلف بفعل الجليد، أو محاولة وضع نموذج رياضي لتدهور الحجارة، أول مقارنة آلية تدهور الجليد مع آليات تلف أخرى مثل تبلور الأملاح، هذه الأهداف المختلفة يمكن جمعها في مسألتين وهما: التقييم، والتنبؤ بمقاومة الحجارة للجليد مع تحديد آليات التدهور المرتبطة بالجليد.

في كل الدّراسات المطبقة لإحداث التآلف الإصطناعي عن طريق دورات التجمد والذوبان المختلفة، تم تطبيق شروط اختبار تتوافق إما مع المعايير المعمول بها في بلد الدّراسة (المعيار الأوروبي (NF EN 12371(2010)، أو المعيار التركي (TS 699)، أو وفقاً لمناخ المنطقة التي تتواجد فيها الحجارة محل الدّراسة.

وعموماً يمكن أن يقع التجمد بين درجات حرارة تتراوح من (-40 و -5)°م، أما سرعة التبريد فهي مختلفة، حيث تتراوح من 1°م في ساعة إلى التجمد الفوري، كما أنّ مدة الدورات متغيرة من أربعة (4) ساعات إلى يوم واحد، بالإضافة إلى معايير أخرى تتعلق بنوع الدّراسة مثل حجم وشكل العينات، ودرجة التّشبع، وإمدادات الماء أثناء دورات التجمد والذوبان.

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

المرجع	الهدف	الجليد	الدواب	تقنيات قياس التغيير
Nicholson 2000	تقييم مقاومة الصخور الرسوبية للجليد، وتحديد كل من العيوب الموجودة مسبقاً وتأثيرها على شدة الضرر	هواء $T_{\text{mini}} = 18 - \text{°م}$ الزمن(ز) = 18 سا	ماء $T_{\text{max}} = 18 + \text{°م}$ زمن = 6 سا	فيزيائي: الوزن ملف بياني لحالة التدهور
Mutluturk 2004	- إقتراح نموذج رياضي يبين عملية فقدان كمال الصخور المعرضة لدورات التجمد والدواب. - صلاحية النموذج المقترح من خلال الدراسات المخبرية	الهواء $T_{\text{mini}} = 20 - \text{°م}$ الزمن(ز) = 2 سا	الماء $T_{\text{max}} = 20 + \text{°م}$ الزمن = 2 سا	- فيزيائي: الكثافة -الوزن: جاف/ مشبع- المسامية الكلية -الميكانيكية: سرعة الموجة، صلابة السطح - التركيب المعدني
Alting 2004	- التحقق من النموذج الرياضي المقترح من طرف mutluturk 2003 حول فقدان الصخور لجمالها - تحديد الآثار المترتبة على تكرار دورات التجمد والدواب	(المعيار التركيبي (699 TS)	(المعيار التركيبي (699 TS)	ميكانيكي:- سرعة الموجة $V_p$ ، ضغط أحادي المحور، الشد البرازيلي، مؤشر القوة لنقطة التحميل، انقذاب الكتلة
Bayram 2012	التنبأ بفقدان المقاومة الميكانيكية في المناطق الباردة			فيزيائية:- المسامية، امتصاص الماء ميكانيكية: الضغط والشد، والانحناء، ومعامل يونغ
Chen 2004	- دراسة التأثيرات المترتبة على درجة التشبع الأولية لصخور تتعرض لدورات التجمد والدواب - دراسة هجرة الماء داخل المسام أثناء فترة التجمد	هواء $T_{\text{mini}} = 18 - \text{°م}$ ز = 2 سا	ماء $T_{\text{max}} = 14 \text{°م}$ الزمن = 1,5 سا	الملاحظات البصرية الفيزيائية: المسامية ميكانيكية: الضغط، سرعة الموجة فوق الصوتية $V_p$
Bost 2007	توقع التشقق الطبيعي للصخور في حالة تعرضها لدورات التجمد والدواب - تقدير الضغوط الناجمة عن الجليد	هواء $T_{\text{mini}} = 5 - \text{°م}$ ز = 4-5 سا	ماء $T_{\text{max}} = 20 + \text{°م}$ الزمن = 4-5 سا	الملاحظات البصرية مخطط التوتر على طول العينات عن طريق تحليل عكسي باستخدام برنامج (CESAR-LCPC)
Saad 2010	تأثير تغيير المناخ والظروف القاسية على الصخور المتشققة ودور السوائل في عملية التلف	هواء $T_{\text{mini}} = 5 - \text{°م}$ ز = 6 سا	ماء $T_{\text{max}} = 20 + \text{°م}$ زمن = 6 سا	الفيزيائية: نفاذية الماء الميكانيكية: معامل المرونة الديناميكي
Yavuz 2010	دراسة تأثير دورات التجمد والدواب على تدهور الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لحجارة الأندسايت	هواء $T_{\text{mini}} = 20 - \text{°م}$ الزمن = 6 سا	ماء $T_{\text{max}} = 18 + \text{°م}$ الزمن = 18 سا	الفيزيائية: ميكانيك امتصاص الماء الميكانيكية: سرعة الموجة $V_p$ صلابة، الضغط، كشط السطح

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

الملاحظات البصرية: تطور البنية المجهرية والتسريح الفيزيائية: الوزن، المسامية المفتوحة الميكانيكية: سرعة موجة $V_p$ ، الضغوط	ماء $T_{max} = +20^{\circ} \text{ م}$ الزمن = 6 سا المعيار الأوروبي (NF EN 12371)	هواء $T_{mini} = -12^{\circ} \text{ م}$ الزمن = 6 سا المعيار الأوروبي (NF EN 12371)	دراسة مقاومة التجمد لعشرة أحجار كربونية للتحقق من فعالية الخواص	<b>Marco Castano 2010</b>
			دراسة المقاومة الميكانيكية وتطور الخصائص البتروفيزيائية وتراجع النمو الخطي	<b>Martinez-Martinez 2013</b>
الملاحظات البصرية الفيزيائية: المسامية، المسام توزيع نصف قطر المسام الشعيرية، درجة التشبع الميكانيكية: الشد، سرعة الموجة $VP$ ، التمدد الحراري	ماء $T_{max} = +20^{\circ} \text{ م}$ الزمن = ؟	هواء $T_{mini} = -20^{\circ} \text{ م}$ الزمن = 16 سا	تحقق من معايير لدورات التجمد والذوبان (عدد الدورات يكون منخفضة جداً)	<b>Ruedrich 2011</b>
الفيزيائية: الوزن جاف/ مشبع، المسامية، التشبع الميكانيكي: ضغط أحادي المحور، وثلاثي المحور	ماء $T_{max} = +40^{\circ} \text{ م}$ الزمن = 4 سا	هواء $T_{mini} = -40^{\circ} \text{ م}$ الزمن = 4 سا	تأثير عدد من دورات التجمد والذوبان على الخواص الميكانيكية للجرانيت	<b>Tan 2011</b>
الميكانيكية: الشد، مقاومة الحمولة النقطية	ماء $T_{max} = +20^{\circ} \text{ م}$ الزمن = 12 سا	هواء $T_{mini} = -20^{\circ} \text{ م}$ الزمن = 12 سا	توقع الإستدامة على المدى الطويل باستخدام نموذج إنطلاقاً من تناقص سلامة الحجارة	<b>Jamshidi 2013</b>
- الفيزيائي: المسامية، قياس التغير، كثافة المواد، الكثافة الظاهرية - الميكانيكية: مقاومة الضغط، والشد، التشققات، سرعة الموجة $V_p$	ماء $T_{max} = +20^{\circ} \text{ م}$ زمن = $H_6$ (المعيار الأوروبي) (NF EN 12371)	الهواء $T_{mini} = -20^{\circ} \text{ م}$ زمن = $H_6$ (المعيار الأوروبي) (NF EN 12371)	تأثير الإجهاد الحراري والتجمد على الخواص الميكانيكية للحجارة الجيرية المسامية (ثلاثة أنواع من الحجارة الجيرية)	<b>Zita Pápay1, Ákos Török1 2014</b>
- الفحص المجهرى للأضرار - الفيزيائي: قياس المسامية ومعامل التشبع، والنفاذية - الميكانيكية: مقاومة الضغط والشد، سرعة الموجة $V_p$	ماء $T_{max} = +10^{\circ} \text{ م}$ زمن = $H_6$ (المعيار الأوروبي) (NF EN 12371)	الهواء $T_{mini} = -10^{\circ} \text{ م}$ زمن = $H_6$ (المعيار الأوروبي) (NF EN 12371)	الضرر الناتج عن تجمد الحجارة الجيرية المستخدمة في التراث المبني: دراسة السلوك الهيدروميكانيكي	<b>Charlotte Walbert 2015</b>

الجدول رقم 15: بين أهم الدراسات المخبرية المتعلقة بتأثير الجليد وأهدافها

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

### VII- أساليب تقييم استدامة الحجارة للجليد

يُعد تقييم استدامة الحجارة المشكّلة لهياكل المباني خاصة الأثرية منها، من المواضيع الهامة والضرورية لتقدير ديمومتها في البناء أو في عمليات الترميم قبل أي تدهور ظاهر، أما عملية التقييم في حد ذاتها فهي تعتمد على عدة أساليب يمكن إجمالها في طريقتين:

- الطريقة المباشرة: تتم من خلال الملاحظات البصرية والمجهرية، أو فقدان الوزن، والتّمدد، والتحلل، و *gélifrac*.

- الطريقة الغير المباشرة: تتم من خلال الكشف عن التّطورات أو التّعديلات التي تحدث للبنية المجهرية، و/أو الخواص الفيزيوميكانيكية نتيجة دورات التّجمد والذّوبان:

الخصائص الفيزيائية يتم تقييمها من خلال قياس تطور المسامية ونسبة الإمتصاص والتّشبع، فزيادتها تعني حدوث تغيّرات في البنية المجهرية، فتح الشقوق الموجودة مسبقاً، و/أو تشكيل شقوق مجهرية، و/أو توسّع أو انهيار المسام).

في حين الأضرار الميكانيكية يتم تقديرها إما من خلال قياس سرعة الموجة  $V_p$ ، قياس معامل الديناميكي للمرونة، أو عن طريق قياس المقاومة الميكانيكية للضغط  $R_c$  أو الشّد، إذ يشير العديد من الباحثين ومن بينهم Charlotte walbert<sup>(1)</sup> إلى أنّ مقاومة الضّغط ومعامل المرونة تتناقص مع زيادة عدد دورات التّجمد والذّوبان.

### VII-1- اختيار المعلمات التجريبية

لكي تكون الإختبارات المخبرية ذات نجاعة يجب أن تكون الخواص التّجريبية المختارة قابلة للقياس للتمكن من توصيف الأضرار التي تصيب الحجارة، مع إمكانية تحديدها كمياً بعد اختبارات الشّيوخة المتسارعة، والتي يمكن تصنيفها في فئتين:

- الخواص الفيزيائية (المسامية، الكثافة، الإمتصاص، التّشبع والتّفاذية)؛

(1) -Charlotte walbert, Op.cit ,pp23,24

## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

- الخواص الميكانيكية (سرعة الموجة، مقاومة الضّغط، معامل يونغ).

أما اختيار العوامل المقاسة فيتم وفق معيارين رئيسيين: (1)

- اختيار العامل المقاس يرتبط بشكل وثيق بالخصائص الفيزيائية والميكانيكية التي تؤثر وتتأثر بآليات تدهور الجليد؛

- اختيار أساليب كشف غير إتلافية (باستثناء اختبارات مقاومة الضّغط)، لكي تسمح لنا بزيادة عدد القياسات والحصول على متوسط للقيم، فضلاً عن تتبع مراحل التّدهور.

### VII-2-المبادئ الأساسية لقياس تلف الحجارة تحت فعل الجليد

يمكن إجمال أهم المبادئ التي يمكن أخذها بعين الاعتبار في تجارب تحديد أو تقييم الأضرار التي تصيب الحجارة بفعل الجليد في النقاط التالية (2):

- يجب أن تكون ظروف التّجمد أقرب إلى تلك الموجودة في الموقع؛

- يجب أن يتم التّطبيق المباشر على الكتل الحجرية؛

- يجب أن يتم تحديد خواص الحجارة الفيزيائية والميكانيكية قبل وبعد دورات التّجمد والذّوبان؛

- يجب أن يكون حجم عينات الإختبار ذات أبعاد قياسية (Normalisées)، حيث يمكن

أخذ عينات مكعبة 5x5x5 سم<sup>3</sup>، أو اسطوانية قطر 45 ملم ارتفاع 90 ملم؛

- يجب التّكيف مع إجراءات الإختبار للتأكد من طبيعة الدّورات (قياس العينات، الوزن،

المسامية، عدد الدّورات، ...)

- يراعي في اختبارات الجليد على الحجارة أن يكون التّجمد في الهواء والذّوبان في الماء.

(1) - Rana Ezzedine, Op.cit , p 80.

(2)- C. tourenq , Op.cit ,p40



## الفصل الرابع: آليات تأثير الجليد على الحجارة

### الخلاصة

يُعد الجليد من أبرز العوامل المناخية التي لها تأثير سلبي على ديمومة الحجارة المكونة للمباني الأثرية، خاصة المكشوفة منها والغير المحمية والتي تتواجد في المناطق ذات مناخ شديد البرودة، حيث تتعرض لموجات جليد قد تكون يومية أو موسمية خلال فصل الخريف والشتاء وقد تمتد حتى إلى فصل الربيع.

ويرتبط الفعل الإِتلافي للجليد على الحجارة المشكلة للمباني الأثرية بعدة عوامل، أبرزها طبيعة خواصها الجوهرية (التركيبية الكيميائية والمعدنية، حجم الحبيبات، النفاذية، والمسامية، محتوى الماء، الكثافة، درجة التشبع، درجة الصلابة، المقاومة الميكانيكية)، إلى جانب العوامل الخارجية كالظروف المناخية التي تتحكم في ظروف وشدة ومدة وعدد دورات التجمد والذوبان (درجة الحرارة الدنى، ومدة التعرض)، فضلاً عن إمدادات الماء قبل أو أثناء دورات التجمد والذوبان، والتي تؤثر بشكل سلبي على جودة وكفاءة هذه الخواص، والتي تتعكس بصورة مباشرة على معدل الضرر الذي يصيب هذه الحجارة.

وبشكل عام فإن مظاهر تلف الحجارة المرتبطة بفعل الجليد متعددة ومتفاوتة الخطورة، نادراً ما تكون موحدة بسبب التباين في خواصها الجوهرية وحالة حفظها، وشدة وعدد ومدة دورات الجليد (التجمد والذوبان)، حيث يؤدي إما إلى تدهور سطحي يأخذ أشكالاً مختلفة، من تشوهات وتقشر وتشققات وتجاويف التي يمكن أن تنتقل إلى طبقات أخرى (قلب الحجارة) في غياب التدابير الوقائية، أو إلى تدهور داخلي، كتوسع حجم المسام، و/أو إحداث تشققات دقيقة على المستوى المجهرى، و/أو توسع تلك الموجودة مسبقاً، سواء داخل الحبيبات، أو بين الحبيبات، مما يضعف البنية الداخلية لهذه الحجارة، والذي ينعكس سلباً على صلابتها ومقاومتها وبالتالي ديمومة المباني المتشكلة منها.

الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

---

الفصل الخامس:

الجانب التطبيقي

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

لإبراز التدهور الذي يحدثه الجليد على حجارة الموقع الأثري لجميلة، وتقدير التغيرات الذي تطرأ لخواصها، ارتأينا أن نقسم هذا الفصل إلى ثلاثة أقسام، الأول نقدم فيه عينات الدراسة، أما الثاني نخصه إلى تقديم طرق الفحوصات الحقلية والتحاليل المخبرية المعتمدة لتعيين التركيب الكيميائي والمعدني، والخواص الفيزيائية والميكانيكية لعينات الحجارة، بالإضافة إلى بروتوكول الشخوخة الإصطناعي عن طريق دورات التجمد والذوبان، بينما الأخير نعرض فيه نتائج الاختبارات ومناقشتها وأهم الاستنتاجات والتوصيات.

### I - عينات الدراسة

حسب متطلبات البحث، تقرر إختيار عينات من ثلاثة أنواع من الحجارة الأكثر استخداماً في مباني الموقع الأثري لجميلة كنموذج للدراسة: حجارة التوف، وحجارة البيوكلاست، والحجارة الكلسية الصلبة، فضلاً عن ذلك، فهذه الحجارة تبدي مظاهر تدهور مختلفة، وبالتالي فهي تشكل مجموعة من الحجارة لديها سلوك غير موحد اتجاه التلف.

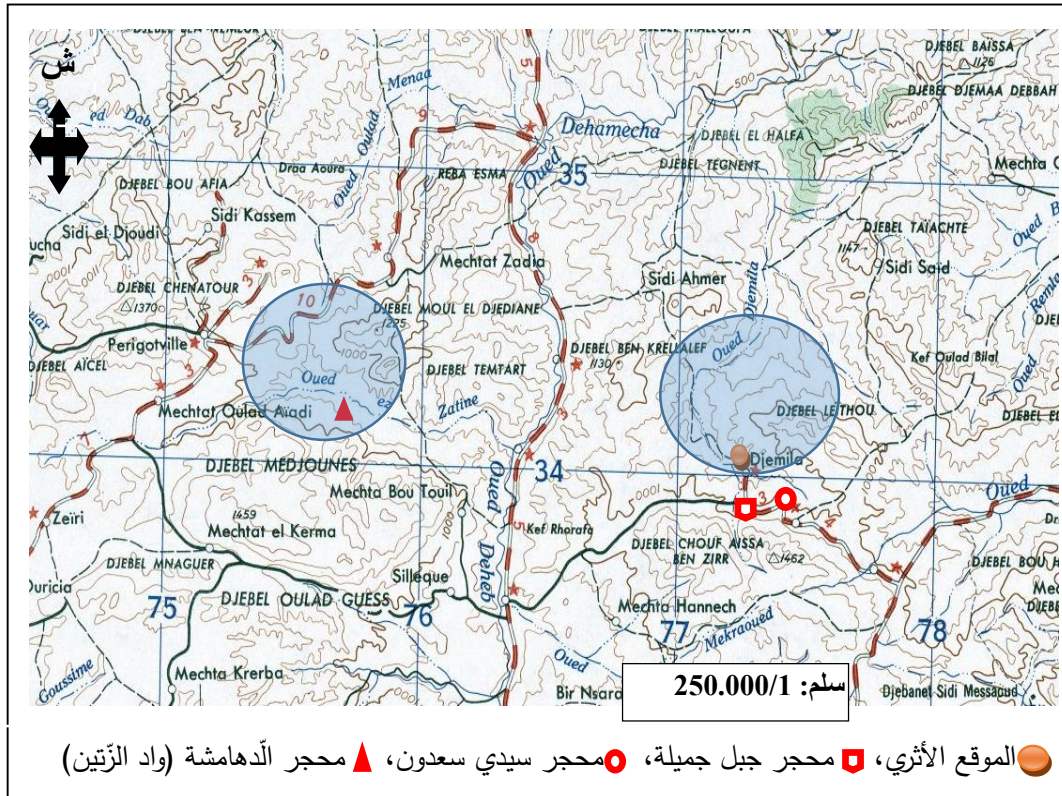
#### I-1- أخذ العينات

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 واستغلال الممتلكات الثقافية المحمية (Ogebc) لا يسمح لنا بأخذ العينات من الموقع الأثري، لذا لجأنا إلى أخذ عينات من نفس صنف هذه الحجارة لكن من المحاجر التي جلبت منها اعتماداً على الدراسة التي انجزت في إطار مشروع Medistone<sup>(1)</sup>، والتي هدفت إلى تحديد أنواع ومصدر الحجارة التي استخدمت في إقامة عمران هذا الموقع الأثري، والتي بينت أن أغلبها عبارة عن حجارة كلسية، جلبت من محاجر محلية محيطة بالموقع الأثري كما هو مبين في الخريطة رقم 6، ومن أهم هذه المحاجر نذكر:

(1) - Dessandier, et all ,Op.cit, pp145 - 160.

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

- المحجر الأول: يقع جنوب الموقع الأثري بجبل جميلة على بعد حوالي 1 كلم (الصورة رقم 83)، حيث تظهر كتله الصخرية وجود آثار استخراج قديمة جداً (الصورة رقم 84).
- المحجر الثاني: يتواجد جنوب شرق الموقع الأثري بمنطقة تعرف بجبل سيدي سعدون (الصورة رقم 85)، كما يلاحظ وجود بقايا لعناصر معمارية قرب ضريح الولي الصالح سيدي سعدون كما يظهر في (الصورة رقم 86)، وأيضاً يلاحظ على كتله الصخرية آثار استخراج كما يظهر في الصورة (رقم 87).
- المحجر الثالث: يقع غرب الموقع الأثري بالضبط في الضفة الجنوبية لواد الزيتين بالقرب من منبع مائي حار مستغل حالياً كحمام معدني يعرف "بحمام الدهامشة" (الصورة رقم 88)، حيث تحتوي كتله الصخرية أيضاً آثار استخراج قديمة جداً، فضلاً عن انتشار لبقايا من قواعد وأبدان الأعمدة.



الخريطة رقم 6: تبيّن مواقع المحاجر التي جلبت منها العينات الحجرية (1)

(1)-[http://legacy.lib.utexas.edu/maps/ams/north\\_africa/txu-oclc-6949452-nj31-16.jpg](http://legacy.lib.utexas.edu/maps/ams/north_africa/txu-oclc-6949452-nj31-16.jpg)(.adaptée et modifiée)



## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي



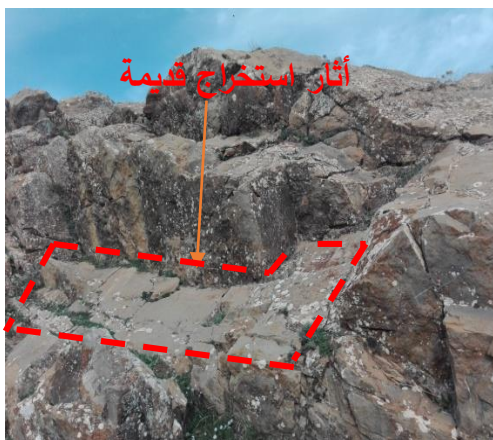
الصورة رقم 84: تبين آثار استخراج قديمة على كتل صخرية بمحجر جبل جميلة



الصورة رقم 83: تبين محجر جبل جميلة الذي جلبت منه العينة 1ع



الصورة رقم 85: تبين جبل سيدي سعدون جلبت منه العينة 2ع



الصورة رقم 87: تبين آثار استخراج الحجارة من بمحجر سيدي سعدون



الصورة رقم 86: تبين أجزاء من كتل حجرية وعناصر معمارية بمحجر سيدي سعدون



## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي



الصورة رقم 88: تبين مقلع حجارة التوف الكهفي بواد الزيتين الدّهامشة جلبت منه العيّنة ع3

### 2-I - تحضير العينات

يكمّن الهدف من هذه العملية تحضير عينات الحجارة تستجيب لمتطلبات تحقيق تجارب الشيوخوخة الإصطناعية عن طريق دروات التّجمد والذّوبان، وفحوصات تعيين الخواص الفيزيائية والميكانيكية، فبعد أخذ الحجارة من المحاجر إلى الورشة، قمنا بتنظيفها، وحاولنا في بداية الأمر الحصول على عينات ذات شكل مكعب بقياس (5x5x5 سم<sup>3</sup>) باستخدام آلة قاطعة، لكن بسبب صعوبة عملية القّص تحصلنا على عينات غير منتظمة الشكل كما تملك على سطحها ثقب (الصورة رقم 89)، وعليه تم التّفكير في حل آخر فاهتدينا إلى تحضير عينات أسطوانية الشكل باستخدام آلة الحفر للحجارة تعرف بإسم كاروتوز Carotteuse على مستوى ورشة مخبر البناء والأشغال العمومية "حمدي" بالعاصمة، وتقطيعها بالآلة قاطعة (الصورة رقم 90: أ، ب)، حيث تحصلنا على عينات أسطوانية ذات قياس (9,00×4,50 سم) (الصورة رقم 91).



الصورة رقم 89: تبين عملية تحضير العينات بشكل مكعب

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي



ب



أ

الصورة رقم 90: تبين عملية تحضير العينات الأسطوانية (أ-آلة حفر العينات كاروتوز، ب-آلة تقطيع العينات)



الصورة رقم 91: تظهر عينات الحجارة الأسطوانية المحضرة

### I-3 - أنواع الحجارة

للتفريق بين الحجارة المدروسة تم تقسيمها إلى ثلاثة مجموعات:

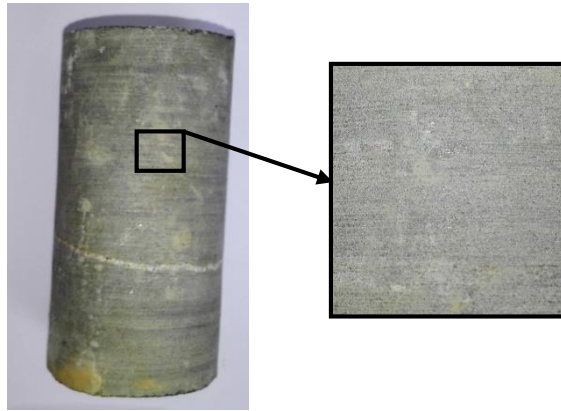
أ-المجموعة رقم 1: حجارة كلسية صلبة ذات لون رمادي وحبيبات ناعمة دقيقة يرمز لها ب (1ع) (الصورة رقم 92)، جلبت من محجر يقع جنوب الموقع الأثري بجبل جميلة، وهي تعتبر من الصخور الرسوبية، لديها مظهر ناعم، ولون رمادي فاتح، كما تتميز باحتوائها على شبكة من العروق المليمترية، مملوءة ببلورات الكالسيت ذات اللون الأبيض، فضلاً عن ذلك، فهي إحدى حجارة البناء الأساسية للموقع الأثري، حيث استخدمت على شكل كتل حجرية مصقولة، ودبش، كما استعملت أيضاً كعناصر معمارية من أعمدة وتيجان، كما استخدمت كأسكاف وأكتاف للأبواب والنوافذ.

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي



الصورة رقم 92: عينة الحجارة الكلسية البنية الصلبة (1ع)

ب- المجموعة رقم 2: الحجارة الجيرية من نوع البيوكلاست الرمادية ذات الحبيبات الناعمة (الصورة رقم 93)، يرمز لها بـ (2ع)، جلبت من مقلع حجري يقع جنوب شرق الموقع الأثري في منطقة تعرف بجبل سيدي سعدون، تُعد من الصّخور الرّسوبية، وهي ذات صلابة جيدة، ولون رمادي فاتح، ونسيج ناعم، كما تتميز بإحتوائها على عروق الكالسيت ذات لون أبيض، وقد استعملت كحجارة مصقولة في العديد من معالم الموقع الأثري لجميلة (الكابيتول، معبد العائلة السّيفيرية، المسرح، قوس كركلا) وغيرها من المعالم.



الصورة رقم 93: عينة حجارة البيوكلاست الرمادية ذات الحبيبات الناعمة (2ع)

ج- المجموعة رقم 3: حجارة التّوف الكهفي أو الحرماي، يرمز لها بـ (3ع)، جلبت من مقلع حجري يقع على الصّفة اليمنى لواد الرّتين، تعرف بحمام الدّهامشة، هذه الحجارة تعتبر من الصّخور الرّسوبية الجيرية، تتميز بلون رمادي فاتح أو مائل للإصفرار، ذات باتينة رمادية فاتحة اللّون، (الصورة رقم 94)، زيادة على ذلك فهي تمتلك مظهراً بركانياً إسفنجياً، تملؤه

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

العديد من الثّقوب والتّجاويف بمختلف الأحجام والإتجاهات، وهي ذات أبعاد متعددة قد تصل إلى بعض السنتيمترات (1,50سم)، وعمق يمتد إلى قلب الحجارة وأحياناً تخترقها، وهي ذات صلابة ضعيفة، ولقد استعمل هذا النوع من الحجارة كدبش في جدران وأقواس في العديد من معالم الموقع (الحمامات الكبرى، والكابيتول ومعبد العائلة السيفيرية).



الصّورة رقم 94: عينة من الثّف الكهفي تحتوي فتحات وتجاويف (ع3)

### II – بروتوكولات تحديد الخصائص الكيميائية والبتروفيزيائية

تمتلك الحجارة موصفات معينة، وهي تختلف حسب طبيعة تركيبها المعدني، وجودة خواصها الفيزيائية والميكانيكية، غير أنها قد تتعرض للتغيّر بفعل الزّمن، لذا فمعرفة وتقدير خصائصها الجوهرية يساعد في فهم وتفسير ظواهر التّدهور التي تصيبها ومعرفة أسبابها، فضلاً عن تقييم وتقدير التّغير الذي قد يحدث لخواصها، والتي تنعكس سلباً على صلابتها وديموميتها وبالتالي على ديمومة المباني المتشكّلة منها، ويمكن تحديد الخصائص الجوهرية للعينات المدروسة باتباع إحدى الطّرق التّالية:

#### II-1 - تقنيات تحديد التّركيب الكيميائي والمعدني

يُعد معرفة التّكوين الحجري ذو أهمية بالغة، فعلى أساسه يمكن استنتاج نوع الحجارة، ومعرفة مسببات التّلف الذي أصابها، فضلاً عن تقدير التّغيرات المحتملة لخواصها، بالإضافة إلى اختيار أفضل المواد والأساليب الوقائية والعلاجية، ولتّحديد ذلك، أختيرت طريقتين:

- طريقة فلورة الأشعة السينية؛

- طريقة حيود الأشعة السينية.



## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

### II-1-1-1- تعيين التركيب الكيميائي بطريقة فلورة الأشعة السينية

تُعد تقنية فلورة الأشعة السينية (FRX)، أحد أبرز التحاليل غير الإتلافية المستخدمة في مجال الآثار، خاصة على الحجارة، إذ تسمح بالتعرف على التركيب الكيميائي للعناصر المتواجدة في المواد من خلال إثارة الذرات بقذفها بالأشعة السينية (1)، إذ هذه التقنية تمتلك دقة كبيرة حيث يمكن أن تصل إلى 100% (2).

لقد قمنا بتعيين التركيبة الكيميائية لعينات الدراسة على مستوى مخبر المركز الوطني للبحث العلمي والتقني للتحاليل الفيزيائية والكيميائية ببوسماعيل (ولاية تيبازة) عام 2018، بتقنية فلورة الأشعة السينية، تم تحضير العينات بطحنها على شكل مسحوق (حببيات ذات قطر لا يتعدى 20 ملم)، ثم وضع هذا المسحوق في جهاز خاص يطلق عليه مطياف الأشعة السينية (Spectromètre fluorescence des rayons de X) من نوع «ZSX Primus II Rigaku» الصورة رقم 95.



الصورة رقم 95: تبين جهاز فلورة الأشعة السينية من نوع «ZSX Primus II Rigaku» وجهاز سحق العينات

(1) - Rami Abou Sleiman et all, dictionnaire des termes scientifiques (anglais, français, arabe), dar al kotob al ilmiah, Bierut Lebanon, 2007, p 906.

(2) - [http://representatives.spectro.com/spectro-france/products/xrf?gclid=cj0kcqiaurjgbrqarisad09sg-exz5upz5kfvio6qpu95mjxygvvxybpurweeydsmpiktccnw32lmmaqnrealw\\_wcb](http://representatives.spectro.com/spectro-france/products/xrf?gclid=cj0kcqiaurjgbrqarisad09sg-exz5upz5kfvio6qpu95mjxygvvxybpurweeydsmpiktccnw32lmmaqnrealw_wcb), [consulté le 30 septembre 2018].



## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

### II-1-2- تعيين التركيب المعدني بطريقة حيود الأشعة السينية

تعتبر طريقة حيود الأشعة السينية (DRX) من تقنيات التحليل غير الإتلافية، والتي تقدم معلومات حول البنية البلورية والتركيب المعدني للعينات<sup>(1)</sup>، يقوم مبدأ هذه التقنية على إرسال حزمة من الأشعة السينية أحادية الطول الموجي إلى مسحوق العينات، مما يتسبب في انعراجها عن مسارها الأصلي، وبذلك يتم الحصول على مخططات لطيف الأشعة السينية بدلاله زاوية الحيود $\theta$ ، وبتطبيق علاقة براغ التي تعد أبسط طريقة لوصف حيود الأشعة السينية بواسطة الذرات كما هو موضح في الشكل رقم 41، ونحصل على المسافة بين المستويات البلورية بتطبيق العلاقة التالية<sup>(2)</sup>:

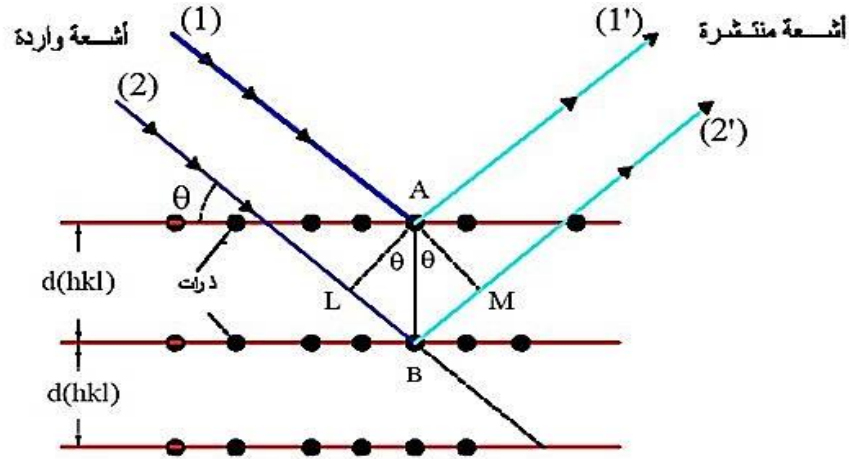
$$2d_{hkl} \sin\theta = \lambda$$

مع  $(d_{hkl})$ : المسافة التي تفصل بين كل مستوى بلورة مجاورة للمؤشرات (h.k.l)

$\theta$ : زاوية حدوث الأشعة السينية على سطح المادة (ذروة الإنعراج).

$n$ : رتبة الحيود (عدد صحيح).

$\lambda$ : الطول الموجي لحزمة الأشعة السينية.



الشكل رقم 41: رسم تخطيطي لمبدأ حيود الأشعة السينية على المستويات البلورية<sup>(3)</sup>

(1) - محمد العيد مشري، إسماعيل شيحي، تأثير الحرارة على الأطوار البلورية في رمل كثبان منطقة ورقلة، حوليات العلوم والتكنولوجيا، جامعة ورقلة، الجزء 6، العدد 2، 2014، ص ص 173-177.

(2) - Tayeb Brouri, Elaboration et étude des propriétés électriques de couches minces et de nano fils de ZnO, Thèse doctorat en Science des matériaux, Université Paris-Est, France, 2011, p35.

(3) - Ibid, p35.

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

لتحديد التركيب المعدني للعينات الحجرية، تم اعتماد بروتكول تجريبي يقوم على تقنية حيود الأشعة السينية (DRX)، وفق طريقة المسحوق، على مستوى مخبر مركز البحث العلمي والتقني للتحاليل الفيزيائية والكيميائية (CRAPC) ببوسماعيل (تيزازة)، باستخدام جهاز حيود الأشعة Bruker D8 Advance A 25 العلامة الموضح في الصورة رقم 96، يعمل وفق طريقة Brentano-Bragg، يمتلك باعثاً للأشعة السينية من نوع Cu K $\alpha$ 1 ذات طول موجي 1.5406 Å، يغذى بمولد ذو توتر قدره 40Kv، وتيار شدته 30Ma، مع مجال للزاوية  $\theta$ 2 من 5° إلى 100°، وحجم الخطوة 0,020°.

لقد سمحت لنا هذه التقنية بتسجيل مخططات حيود الأشعة السينية للعينات المدروسة التي عولجت ببرنامج DIFFRC.EVA V4.0، وفق قاعدة البيانات 2004 PDF.PDF-2، التي تمكن من ترجمة التركيبة المعدنية للعينات.



الصورة رقم 96: تبيين جهاز حيود الأشعة السينية D8 advance Diffractometre

### II-2- برتوكولات تعيين الخصائص الفيزيائية

تعد دراسة الخواص الفيزيائية للحجارة ذات أهمية كبيرة لمعرفة سلوكها اتجاه التلف وتقييم استقرار خواصها مع الزمن، تتمثل هذه الخواص في المسامية ومعامل التثبع، وامتصاص الماء، والكثافة، ويمكن تحديد هذه الخواص بواسطة فحوصات معينة، باستخدام عينات ذات شكل أسطواني، أما قياس الخواص فيتم بطريقة الأوزان الثلاثة (المشبعة، والجافة، والمغمورة).

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

### 1-2-II الكثافة

تعتبر الكثافة بشكل عام عن وحدة كتلة المادة على وحدة كتلة الحجم، وحدتها (غ/سم<sup>3</sup>)، وهي تتغير وفق درجة الحرارة والضغط<sup>(1)</sup>، في حين كثافة الحجارة تعتمد بشكل أساسي على تركيبها المعدني، وطبيعة المسامية السائدة، وتواجد الشقوق، وكمية الماء الموجود في المسام والشقوق، فضلاً عن ذلك، فالكثافة تؤثر بشكل كبير على الصفات الميكانيكية للحجارة، والتي تزداد مع زيادتها وتتنخفض مع نقصانها، وقد أشار إبراهيم محمد عبد الله<sup>(2)</sup> إلى أنّ الكثافة تُعد من أهم الخواص التي يمكن من خلالها تقدير درجة صلابة الحجارة الأثرية، حيث تعد الحجارة صلبة إذا كانت كثافتها بين 2,8 و 3,5 غ/سم<sup>3</sup>، أما إذا كانت أدنى من 2,5 غ/سم<sup>3</sup> فعندئذٍ تعتبر حجارة هشة ضعيفة التماسك والصلابة.

يتم تحديد كثافة العينات بطريقة الأوزان الثلاثة بالإعتماد على ما ينص عليه المعيار الأوربي NF EN 1936، حيث تجفّف العينات في فرن التجفيف في درجة حرارة تقدر بـ 105°م لغاية الحصول على وزن ثابت وهو كتلة العينة وهي جافة (M<sub>sec</sub>)، ومن ثم يتم وضعها في مضخة لتفريغ الهواء الشاغل لمسامتها لمدة ساعتين على الأقل، ثم تنقع في الماء المقطر، بعدها تترك العينات لمدة 24 ساعة أخرى تحت الغمر الكلي في درجة حرارة الغرفة 20°م، ثم يتم مسح سطحها الخارجي بقطعة قماش مبللة ويسجل الوزن المشبع (M<sub>sat</sub>)، ثم تغمر العينات في الماء وتوزن وهي معلقة بحامل داخله ويسجل وزنها وهي مغمورة (M<sub>sub</sub>)، ويتم حساب الكثافة بتطبيق المعادلة التالية:

$$\rho_{dry} = \frac{M_{sec}}{M_{sat} - M_{sub}} \times P_{eau}$$

حيث:  $\rho_{dry}$  = تمثل الكثافة بـ.....(غ/سم<sup>3</sup>)

$M_{sec}$  = كتلة العينة وهي جافة بـ..... (غ)

$M_{sat}$  = وزن العينة وهي مشبعة بالماء بـ ... (غ)

$M_{sub}$  = وزن العينة وهي مغمورة في الماء بـ .. (غ)

$P_{eau}$  = الكتلة الحجمية للماء..... (1 غ/سم<sup>3</sup>)

1- محمد عبد الهادي، مرجع سابق، ص 87.

(2)-إبراهيم محمد عبد الله، مرجع سابق، ص 77.

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

### II-2-2- خصائص الوسط المسامي

تشير العديد من الدراسات إلى أنّ المسامية تُعدّ عاملاً أساسياً في تقدير صلابة الحجارة ومقاومتها للتلف، لأنّ خواصها (الفيزيائية و/أو الميكانيكية) ترتبط بشكل مباشر أو غير مباشر بطبيعة المسامية السائدة، وهذا ما أشار إليه ضياء غاوي صالح (1) بأنّ جودة الخواص الفيزيائية والميكانيكية للحجارة تتناقص مع ازدياد مساميتها، وبما أنّه لا يمكن الوصول لهذه الخاصية بالقياس المباشر، لذا يُعتمد على طرق غير مباشرة تسمح بقياس المعايير التي تُمكن من حسابها ومن بينها:

- حجم الفراغات التي يمكن للسوائل الدخول إليها ( $V_a$ )، وحجم الفراغات التي لا يمكن للسوائل الدخول إليها  $V_{na}$ ؛

- الحجم الكلي  $V_t$  (سم<sup>3</sup>)، الكتلة الإجمالية  $M_t$  (غ)، والكتلة الجافة  $M_{sec}$  (غ)؛

الحجم الصلب  $V_s$  (سم<sup>3</sup>)،

- الكتلة الحجمية  $\rho_s$  (غ/سم<sup>3</sup>).

ويتم تحديد المسامية باعتبار الوسط المسامي جسماً مركباً من جزء صلب ومجموعة فراغات (2)  $(V_t - V_s = V_a + V_{na})$ .

وعند تسخين العينات لدرجة حرارة 105°م تصبح الكتلة جافة ثابتة:

$$\rho_s \times V_s = M_{sec} = M_t$$

أما عند غمر العينات لمدة 48 ساعة فتصبح الكتلة مشبعة بمعنى أنّ:

$$\rho_s \cdot V_d + P_{eau} V_a = M_{sat} = M_t$$

وبناء على ذلك يتم تحديد أنواع المسامية المختلفة على النحو التالي:

(1) - 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، ص 147-148.

(2) - Rana, Ezzedine, Op.cit, p 83.

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

### II-2-2-1-المسامية الكلية $N_{tot}$

تعرف المسامية الكلية للحجارة بأنها نسبة حجم الفراغات أو الفجوات إلى الحجم الكلي للحجارة، مقاسة عند تفريغ الهواء الذي يشغل مساماتها، ولحساب مساميتها الكلية يتم تجفيف العينات في فرن التجفيف عند درجة حرارة 105°م، وليكن وزنها الجاف ( $M_{sec}$ )، ثم توضع هذه العينات في جهاز تفريغ الهواء لمدة ساعتين تقريباً، وتبدأ دورات تفريغ الهواء وضخ الماء المقطر لحين ثبوت قراءة عداد المضخة الذي يعد مؤشراً على انتهاء التفريغ، وبعد ذلك تغمر العينات في الماء لمدة (48) ساعة، ثم يتم وزنها بعد أن يتم مسح سطحها الخارجي بقماش مبلل ويقاس الوزن المشبع ( $M_{sat}$ )، ثم توزن العينة وهي مغمورة ومعلقة داخل الماء الذي يمثل ( $M_{sub}$ )، ويم حساب المسامية الكلية  $N_T$  بتطبيق الصيغة التالية<sup>(1)</sup>:

$$N_t(\%) = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{sub}} \times 100$$

### II-2-2-2-مسامية 48 ساعة ( $N_{48}$ )

تعد مسامية 48 ساعة ( $N_{48}$ )، طريقة فعالة لتقييم المسامية في ظروف التشرب الطبيعية، وهي تتوافق مع الحجم المسامي الذي يمكن للماء أن يدخله بحرية في ظل ظروف الغمر الطبيعي، وتسمى بالمسامية الحرة<sup>(2)</sup>.

ولإجراء هذا القياس، يتم إخضاع العينات للتشرب في الضغط الجوي مع مستوى ماء متوازن ( $H/4$ ) لمدة ساعة واحدة، ثم إلى مستوى ( $H/2$ ) لمدة 23 ساعة، وأخيراً تغمر العينات كلياً لمدة 24 ساعة، حيث  $H$  هو ارتفاع العينة (الشكل رقم 42)، ويتم وزن العينات وهي جافة  $M_{sec}$ ، ثم وهي مشبعة  $M_{sat}$ ، ثم نقوم بوزن الكتلة الهيدروستاتيكية  $M_{sub}$ ، وبعد مدة 48 ساعة من الإختبار يتم تحديد كتلة العينات المشبعة بشكل طبيعي ( $M_{48}$ )، ويتم حساب المسامية بعد 48 ساعة ( $N_{48}$ ) بتطبيق العلاقة التالية<sup>(3)</sup>:

$$N_{48}(\%) = \frac{M_{48} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{sub}} \times 100$$

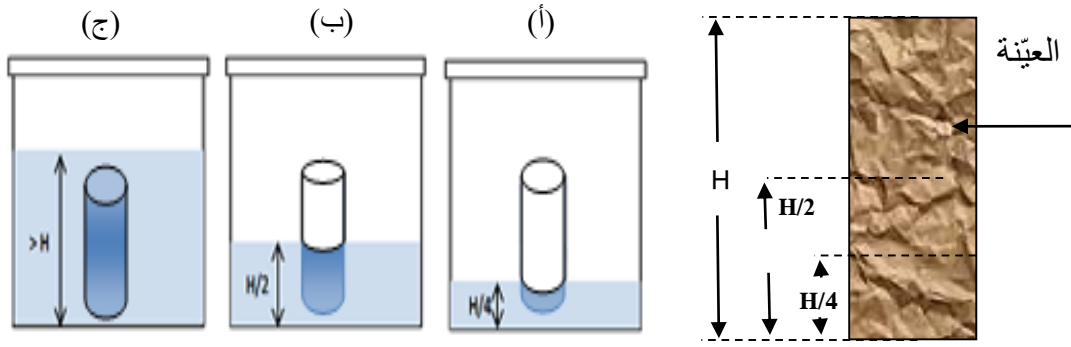
(1) -Damien Linoir, Op.cit, p111.

(2) -Claire Moreau, Op cit, p55.

(3) -Charlotte Walbert, Op.cit ,pp36, 37.



## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي



الشكل رقم 42: تمثيل بياني لإجراء قياس مسامية 48 ساعة (N48)

(أ- مستوى الماء  $H/4$  ل 1 سا، ب- منسوب  $H$  لمدة 24 ساعة، مع  $H$  ارتفاع العينة).

### II-2--3-2- المسامية المحاصرة

تمثل المسامية المحاصرة ( $N_p$ ) حجم المسام الذي لا يمكن للمياه الدخول إليها في الظروف الطبيعية للضغط الجوي، ودرجة الحرارة، ويتم حسابها وفق العلاقة التالية (1):

$$N_p = N_{tT} - N_{48}$$

### II-2-2-4- معامل التشبع (S48)

ترتبط درجة تلف الحجارة بفعل الجليد بمدى تشبعها بالماء، لذا فمعرفة نسبة تشبعها يُعد أمراً بالغاً للأهمية، حيث يمكن تحديدها من خلال قياس مؤشر أو معامل التشبع  $S_{48}$  Hirschwald، الذي يتوافق مع حالة التشبع الطبيعي للحجارة، إذ يعطي هذا المعامل مؤشراً واضحاً على سلوك الحجارة اتجاه الجليد.

يكون الجليد أقل خطورة على الحجارة إذا كان معامل تشبعها أقل من 80%، يعني أنّ الحجارة مقاومة للجليد، أما إذا كان بين 80% و 85% فالحجارة معرضة للتلف بدرجات متفاوتة، أما إذا تجاوز هذا المعامل عتبة 85% فيكون عندها الفعل الإِتلافي للجليد كبيراً جداً، ويتم حساب معامل التشبع هذا بقسمة قيمة المسامية بعد 48 ساعة ( $N_{48}$ ) على المسامية الكلية للعينة ( $N_T$ ) وفق العلاقة التالية (2):

$$S_{48} = \frac{N_{48}}{N_T}$$

(1) – Ipid, p37.

(2) -Céline thomachot, Op.cit, p17.

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

### II-2-3- معامل الإمتصاص

تعكس خاصية امتصاص الحجارة قدرتها على جذب السوائل إلى شبكتها المسامية من خلال العمل الشعري<sup>(1)</sup>، والتي يتم تحديدها إما بواسطة الشعيرية، أو بالغمر تحت الضّغط الجوي، والتي تعكس نسبة كمية الماء التي يمكن أن تمتصها الحجارة، ويتم التعبير عنها بنسبة مئوية (%). وهي خاصية مهمة للحجارة كونها تؤثر على صلابتها، والتي تمتلك امتصاص متدني تكون أقل تأثراً بتغيرات المناخ (الحرارة، الرطوبة، الجليد)، ويتم تقدير هذه الخاصية بطريقة الأوزان الثلاثة، إذ يتم تجفيف العينات داخل فرن التجفيف في درجة حرارة 105°م حتى الحصول على كتلة ثابتة، بعدها تغمر هذه العينات في حمام مائي لمدة 48 ساعة، ثم يتم وزنها وإعادة غمرها في الماء لمدة 24 ساعة، ويتم تحديد معامل امتصاص الماء  $A_b$  وفق العلاقة التالية<sup>(2)</sup>:

$$A_b(\%) = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100$$

### II-3-3- بروتوكولات تعيين الخصائص الميكانيكية للحجارة

يمكن تقدير السلوك الميكانيكي للحجارة بالإعتماد على مجموعة من المعايير ترتبط بشكل مباشر أو غير مباشر بمقاومتها وصلابتها، من بينها سرعة الموجة فوق الصوتية، ومقاومة الضّغط، وقد يكون أحدهما كافياً لتقييم الأداء الميكانيكي المتوقع للحجارة.

### II-3-1- الفحص بالموجات فوق الصوتية ( $V_p$ )

يُعتبر الفحص بالموجات فوق الصوتية أحد أبرز تقنيات القياس غير المتلفة، والتي استخدمت منذ سبعينيات القرن الماضي في تشخيص حالة الحجارة الطبيعية من منظور التّجانس ودرجة التّلف، حيث من خلال هذا القياس يمكن تقدير العديد من خواص الحجارة من نسبة المسامية، وحالة التشققات، وخصائص المرونة، وهي تعد مؤشر على تدهور

(1) - <https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=tv-nit&pag=228&art=4&niv01=4.5>, [consulté le 15decembre 2018]

(2) - إبراهيم محمد عبدالله، مرجع سابق، ص 78.

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

الحجارة، بمعنى إذا سجلت انخفاض في سرعة الموجة ( $V_p$ ) يعني أنّ الحجرة فقدت جزء من خواصها نتيجة زيادة حجم المسام، و/أو تولد شقوق جديدة أو توسع الموروثه سابقاً<sup>(1)</sup>.

أما بخصوص طريقة القياس، فنتم وفق معيار EN12504-4 (2005)، باستخدام جهاز الفاحص الرقمي المحمول بالموجات فوق الصوتية، المسمى اختصاراً باندتيت (PUNDIT) (Potable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tests)<sup>(2)</sup>، ويقوم مبدأ هذا القياس على تحديد سرعة وزمن " t " لإنتقال نبضات الموجة فوق الصوتية بين المرسل والمستقبل اللذان يبعدان عن بعضهما البعض بمسافة مقدر بـ " d ".

لقد قمنا بتعيين سرعة الموجة  $V_p$  للعينات في المختبر وفي الموقع بالإستعانة بفريق عمل من مخبر البناء والأشغال العمومية "حمدي" بالجزائر العاصمة، باستخدام جهاز الموجات فوق الصوتية من نوع (B-048/P) (PROCEQ, PUNDIT LAB+) الدقة (  $\pm 0,1 \mu s$  ) (Micro-second: $\mu s$ ) الموضح في الصورة رقم 97، يتكون الجهاز من مولد للتنبض، ومحولين للطاقة، أحدها مرسل، والثاني مستقبل.



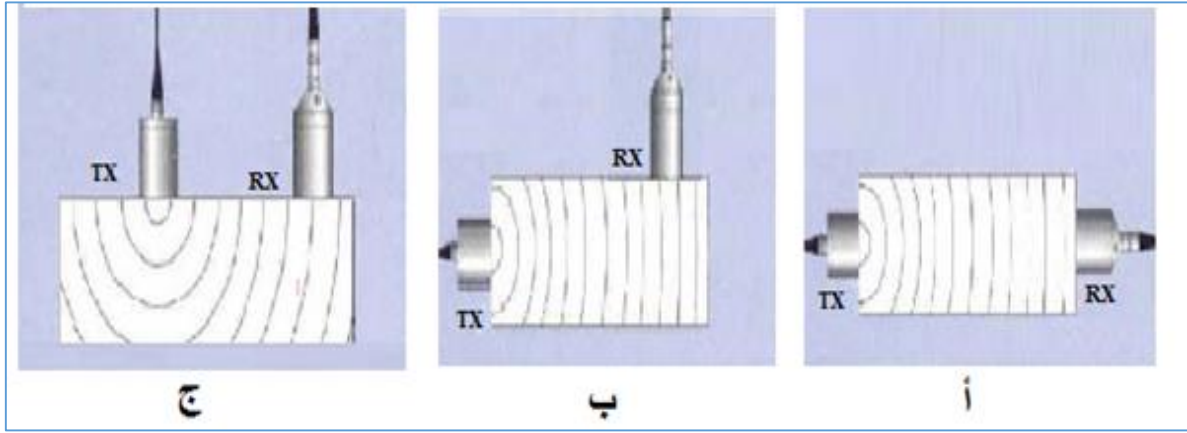
الصورة رقم 97: تبين جهاز قياس سرعة الموجة فوق الصوتية

(1)-Freire-Lista David Martín et all, « Freeze- thaw, fracturing in building granites», cold regions science and technology, doi: 10.1016/j. coldregions,2015,pp 40–51.

(2)- أمير عبد الرحمن هلال الدليمي، الكشف عن عيوب الخرسانة باستخدام سرعة الموجات فوق الصوتية، المجلة العراقية للهندسة المدنية المجلد6، العدد3، 2010، ص ص1-13.

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

أما بخصوص العينات فقد كانت ذات شكل أسطواني، قطر 4,50 سم، ارتفاع 9,00 سم، في حين أسلوب القياس فقد إتبعنا إحدى الطّرق الثلاثة: الطريقة المباشرة الشكل رقم (43-أ)، والطريقة الغير المباشرة (43-ب)، و الطريقة النّصف المباشرة (43-ج). وللاشارة يتم قياس سرعة الموجة  $V_p$  للعينات قبل وبعد اخضاعها لدورات التّجمد والذّوبان، وذلك لمعرفة ما إذا كان هناك فقدان في سرعة الموجة  $V_p$  أم لا.



الشكل رقم 43: يبين أسلوب قياس سرعة الموجة  $V_p$  على العينات

(أ)- الطريقة المباشرة، ب- الطريقة نصف المباشرة، ج- الطريقة غير المباشرة (1)

تتلخص عملية القياس فيما يلي: يتم أولاً إدخال مقاييس العينة في مُولد النبض، ثم يدهن سطحها الخارجي بمادة الفازلين لضمان انتقال جيّد للموجة  $V_p$ ، بعدها يوضع محولي الطّاقة بشكل ملاصق لسطح العينة بإحدى طرق القياس السابقة، ثم يتم تشغيل الجهاز بأنديت، ليقوم محول الطّاقة المرسل ببعث نبضات صوتية تمر عبر جسم العينة، ليلاقيها المحول المستقبل، ويقوم بتحويلها إلى إشارة كهربائية، يتم قراءتها من طرف مولد النبض مرة ثانية ويعطي زمن وسرعة انتقال هذه الموجة أوتوماتيكياً، أما في بعض الأجهزة فيتم تحديد الزمن (t) بين انبعاث الموجة  $V_p$  من المرسل ووصولها للمستقبل، ومن ثم يتم حساب سرعة الموجة فوق الصوتية  $V_p$  بتطبيق العلاقة التّالية(2):

(1)- Samia Hannachi, évaluation de la résistance a la compression du béton sur site : application de la méthode combinée, thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine1, 2015, pp 64,65

(2)-أمير عبد الرحمن هلال الدّليمي، مرجع سابق، ص ص1-13.

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

$$V = d / t$$

مع  $V$ : سرعة الموجة فوق الصوتية  $P$  تقدر ب..... (سم/ثا)

$d$ : المسافة بين محولي الطاقة المرسل والمستقبل ب..... (سم)

$t$ : زمن انتقال الموجة  $V_p$  تقدر ب..... (الثانية)

### II-3-2- مؤشر الإستمرارية

يقصد بمؤشر الإستمرارية النسبة بين سرعة الموجة  $V_p$  المقاسة للعينّة على سرعة الموجة النظرية للمادة المحسوبة من تكوينها المعدني، ويتم تحديده بتطبيق العلاقة التآلية<sup>(1)</sup>:

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

مع:  $V_{exp}$ : السرعة الفعلية للموجة ( $m.s^{-1}$ )

$V_{th}$ : السرعة النظرية للموجة ( $m.s^{-1}$ )

ويتم حساب السرعة النظرية  $V_{th}$  للعينات بتطبيق العلاقة التآلية:

$$V_{th} = \Sigma.C_i.V_i$$

حيث  $C_i$ : النسبة المئوية للمعادن، و  $V_i$ : سرعة الموجات  $V_p$  للمعدن  $i$ .

فضلاً عن ذلك، يتيح مؤشر الإستمرارية حساب النسبة المئوية لكل من مسامية المسام، ومسامية الشقوق وذلك بتطبيق العلاقة التآلية:

$$Ic = 1 - A.n_p - B.n_f$$

مع المسامية الكلية  $N_t = n_p + n_f$

حيث:  $n_p$ : مسامية المسام؛

$n_f$ : مسامية الشقوق؛

$A=1,6$ ، و  $B=2,2$ .

(1) - Charlotte Walbert, Op.cit ,p42.



## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

### II-3-3- اختبار مقاومة الميكانيكية للضغط أحادي المحور

تخضع الحجارة المستخدمة في هياكل البنايات الأثرية على اختلاف أنواعها إلى تأثير قوى مختلفة وذلك حسب موضعها في البناء، والتي يمكن أن نجد لها في حالة ضغط، أو شد، أو انحناء، أو قص، ولسلامة البناء يفضل أن تمتلك حجارته خواص فيزيائية وميكانيكية جيدة، تؤهلها لمقاومة مختلف القوى المؤثرة أو الواقعة عليها.

ومن بين القوى الأكثر تأثيراً قوى الضغط، لذا فتحديد مقاومة هذه القوى يُعد من الإختبارات الأكثر أهمية، التي تتيح لنا تقدير مستوى قوى الضغوط القصوى\* التي يمكن للحجارة أن تتحملها قبل أن تستسلم للتشقّق والإتهيار، ويمكن اعتبار هذه القيمة كافية للتعبير عن أدائها الميكانيكي المتوقع، ويتم حساب مقاومتها للضغط بتطبيق العلاقة التالية<sup>(1)</sup>:

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

مع  $R_c$ : مقاومة الضغط بـ (MPa)

$F$ : القوة المطبقة على العينة بـ (KN)

$A$ : مساحة مقطع العينة بـ (سم<sup>2</sup>)

لقد تم تحديد مقاومة الضغط حسب المواصفات Afnor، بتحضير عينات اسطوانية الشكل (قطر 4,5 سم، وارتفاع 9,00 سم)، يقوم مبدأ الإختبار بوضع العينة في جهاز خاص بقياس الضغط، يتكون من صفيحتين معدنيتين متوازيتين موصولتين بعداد إلكتروني، فبعد إدخال أبعاد العينة في العداد الإلكتروني، نقوم بالضغط على زر التشغيل ليبدأ مكبس الإختبار بتطبيق الحمل العمودي الموزع بشكل منتظم باستمرار بمقدار  $(1 \pm 0,50 \text{ MPa/s})$  حتى تظهر تشققات على العينة، عندها يعطي العداد قيمة معينة تسمى مقاومة الضغط.

تم القيام بهذا الإختبار على مستوى ورشة مخبر البناء والأشغال العمومية "حمدي" بالجزائر العاصمة، باستخدام آلة اختبار من نوع Controlab، كما هو موضح في الصورة

\*- تعرف القوى القصوى هذه بأنها الضغط اللازم تطبيقه لكسر العينة شرط أن تكون قوة ضغط المطبقة محورية ولا تتعرض جوانب العينة لأي نوع من الإجهاد.

(1)- ضياء غاوي صالح، مرجع سابق، ص148.

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

رقم 98، فضلاً عن ذلك، هناك العديد من العوامل التي تؤثر على مقاومة الضّغط الرأسي للحجارة، كنوعية المعادن، وحجم الحبيبات، والمسامية السائدة، والمحتوى المائي، ومعدل التّحميل.



الصورة رقم 98: تبين الجهاز المستخدم في قياس مقاومة الضّغط من نوع Controlab

### II-3-4- إختبار صلابة الحجارة بجهاز السّكليرومتر Scléromètre

يهدف هذا الإختبار إلى تقييم درجة صلابة الحجارة المشكلة لهياكل مباني الموقع الأثري لجميلة، لكن دون إحداث أي أضرار بها، وذلك بتطبيق تقنيات قياس غير إتلافية، تمثلت في استخدام مقياس الصّلابة يعرف بالسّكليرومتر المبين في الصّورة رقم 99.

تم تحديد الصّلابة لحجارة الموقع الأثري من صنف عيّات الإختبار وفق المعيار NF EN 12504-2، في حين مبدأ الإختبار يقوم بقياس إرتداد القضيب الفولاذي المسلط على سطح الحجارة، والذي من خلاله نتحصل على (L'indice sclérométrique (Is مؤشر الإرتداد، الذي يوافق مسافة ارتداد القضيب المعدني، وهو يعتمد على صلابة السّطح الذي تصطدم به كتلة القضيب المعدني، لكون توجد علاقة بين مقاومة الضّغط للحجارة ومؤشر الإرتداد، والأمر المميز في هذا الجهاز أنّه بسيط سهل الإستخدام وأكثر ملائمة لقياس مقاومة الضّغط بصورة سريعة للمواد، فضلاً عن أنه مناسب للإختبارات المخبرية فضلاً عن الميدانية، وهو عبارة عن جهاز ذو شكل أسطواني يتكون من عدة عناصر كما هو مبين في الشّكل رقم 44، يتحكم في هذا الجهاز مؤشر متحرك بنابض متصل بمكبس داخل أنبوب

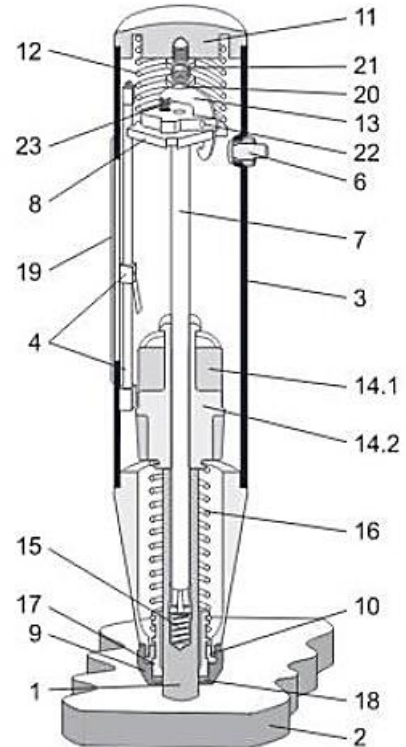
## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

وقائي، ويتم توجيه الجهاز بشكل متعامد بحيث يشكل زاوية قائمة مع سطح الحجارة كما هو مبين في الشكل رقم 45، وبعدها يتم إلقاء كتلة الجهاز على سطح الحجارة، ثم يتم قياس مسافة الإرتداد على سلم مدرج في الجهاز محدد من 10 إلى 100، كما يجب إجراء تصحيح للقيّم التي تم قراءتها لمراعات زاوية الإلقاء اعتماداً على سلم مقياس التصلب<sup>(1)</sup>.



الصورة رقم 99: تبين جهاز قياس مؤشر الصلابة السكليرومتر

- 1-Tige de percussion
- 2- Surface à examiner
- 3-Bâti
- 4-Repère avec tige
- 5-sans affectation
- 6- Bouton-poussoir complet
- 7-Barre de glissement
- 8-Disque de guidage
- 9-Calotte
- 10 -Anneau de pression
- 11 -Couvercle
- 12 -Ressort de pression
- 13 -Verrou
- 14 -Marteau : 14.1 modèle N, 14.2 modèle L
- 15- Ressort amortisseur
- 16-Ressort de frappe
- 17 -Douille
- 18 -Rondelle de feutre
- 19 -Fenêtre en plexiglas
- 20- Vis
- 21 -Contre-écrou
- 22 -Goupille
- 23- Ressort verrouilleur

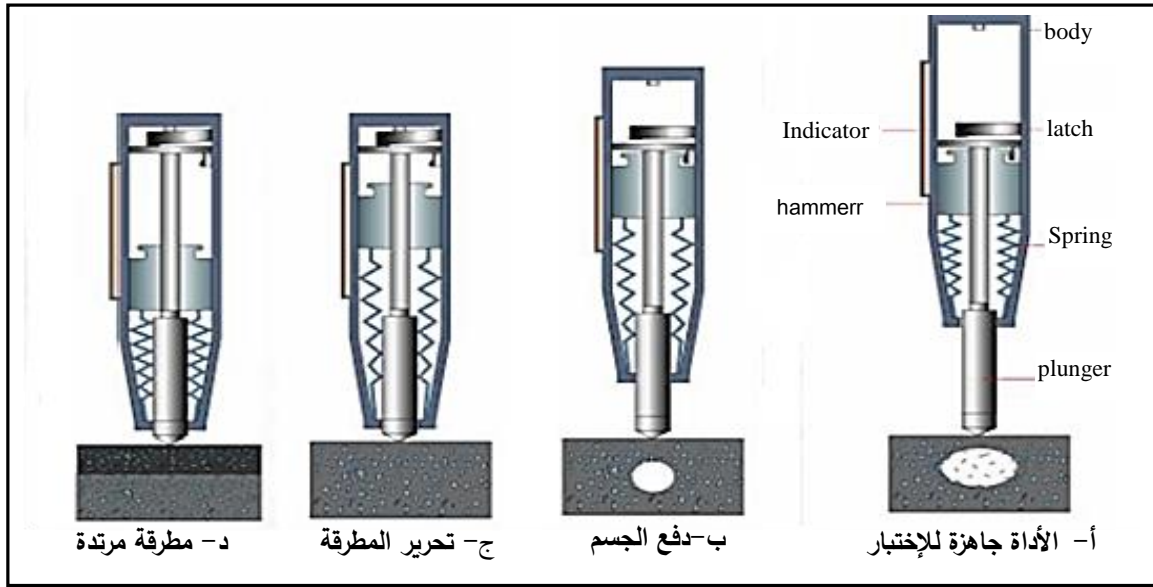


الشكل رقم 44: يبين مقطع طولي لجهاز السكليرومتر<sup>(2)</sup>

(1) - Samia Hannachi, Op.cit, p75

(2) - Mode d'emploi Scléromètre à béton, Proceq SA, Suisse, 2006, p 16.

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي



الشكل رقم 45: يبين مبدأ عمل جهاز السكيلرومتر (1)

### II-4- اختبارات الشبخوخة الإصطناعية عن طريق دورات التجمد والذوبان

يكن الغرض الأساسي من اختبارات الشبخوخة الإصطناعية للعينات الحجرية عن طريق دورات التجمد والذوبان المسرعة، هو تقدير التغيرات التي تحدث لخواصها الفيزيائية والميكانيكية، (المسامية، الكثافة، وفقدان الوزن، ومقاومة الضغط  $R_C$  وسرعة الموجة  $V_P$ )، وفق شروط إختبار تأخذ بعين الإعتبار الظروف المناخية للمنطقة، وشروط المعيار الأوروبي (NF EN 12371(2010) الخاص بتحديد مقاومة الحجاره الطبيعيه للجليد<sup>(2)</sup>.

تم تحضير عينات الإختبار على مستوى ورشة مخبر البناء والأشغال العمومية "حمدي" بالجزائر العاصمة، بإعطائها شكلاً أسطوانياً قطر 4,50سم، وارتفاع 9,00سم (الصورة رقم 100)، ثم يتم تحديد خواصها الفيزيائية والميكانيكية قبل وبعد دروات التجمد والذوبان.

أما إختبار التجمد والذوبان فيتم على مراحل، أولاً تغمّر في الماء العادي في الظروف الطبيعية في درجة حرارة المختبر ( $24 \pm 2^\circ\text{C}$ ) وفي الضغط الجوي لمدة 48 ساعة لضمان التّشبع التّام، ثم تأتي عملية التجمد التي تتم في الهواء في غرفة التبريد مجهزة بوحدة للتحكم في درجة الحرارة (الصورة رقم 101)، أما عملية الذوبان فتتم في الماء.

(1) -I Samia Hannachi,Op.cit,p77.

(2) - Norme NBN EN 12371(2010), méthodes d'essai pour pierres naturelles - détermination de la résistance au gel, comité européen de normalisation(CEN), 2010, p10.

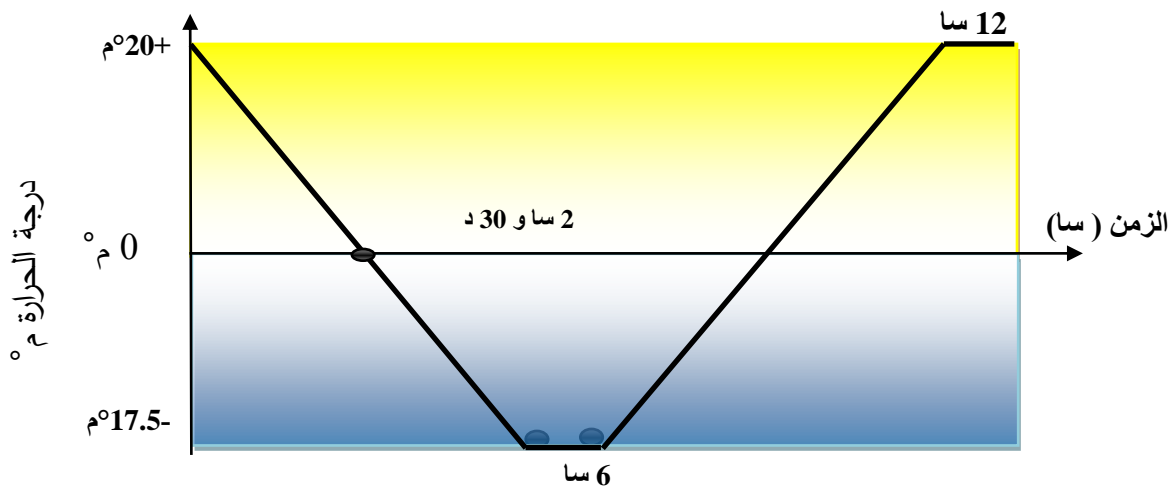
## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي



الصورة رقم 100: تبين عينات الإختبار المحضرة لدورات التجميد والذوبان  
الصورة رقم 101: تبين غرفة التجمد والذوبان

لقد استغرقت دورة التجمد والذوبان الواحدة 12 ساعة، بمعنى ستة (6) ساعات لكل مرحلة، ويتم ضبط غرفة التبريد عند أدنى درجة حرارة مقدرة بـ (-17.5°م)، أما درجة حرارة الذوبان فهي درجة حرارة الغرفة المقدرة بـ +20°م، ثم العكس بمعدل 4°م/سا، تليها مرحلة يتم الإحتفاظ فيها بدرجة حرارة ثابتة لمدة ساعة واحدة عند عتبة (-17.5°م، و +20°م)، كما هو مبين في مخطط الدورة النظرية الممثلة في الشكل رقم 46.

لقد تم تطبيق 14 دورة تجمد وذوبان، وفي نهاية الإختبار يتم اخضاع العينات للفحوصات المطلوبة لتقدير كل من الكثافة، والمسامية، والإمتصاص، ومقاومة الضغط Rc، وسرعة الموجة Vp، وذلك بهدف معرفة وتقدير التغيرات التي تحدث لخواصها الفيزيوميكانكية.

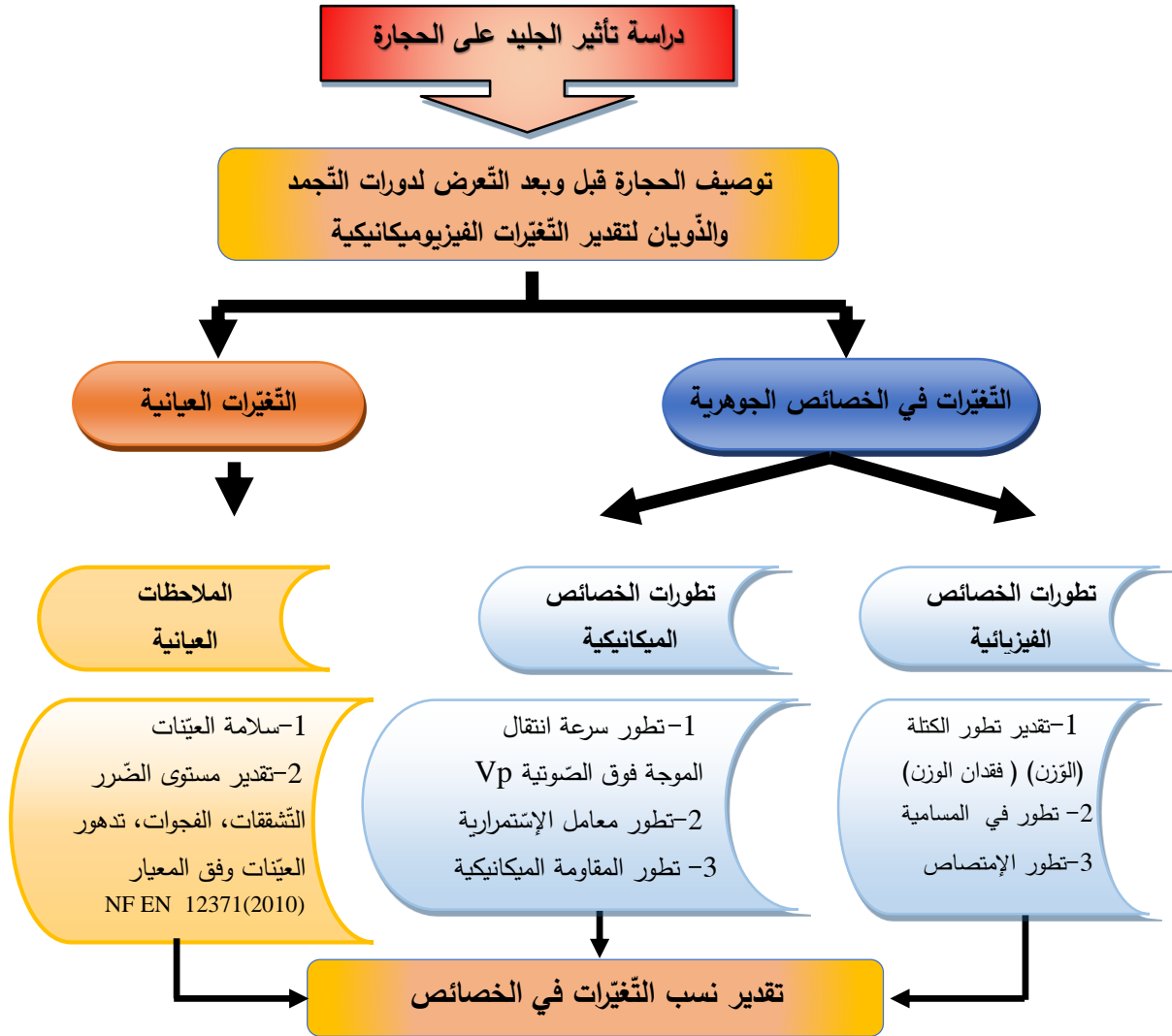


الشكل رقم 46: يوضح مخطط الدورة النظرية للتجمد والذوبان



## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

ولا شك أن الطرق التجريبية المذكورة أعلاه، تسمح لنا بالتعرف على مختلف الخواص الفيزيائية والميكانيكية للحجارة، فضلاً عن تتبع التغيرات التي تحدث لها سواء في بنيتها الهيكلية، و/أو في سلوكها الفيزيائي أو الميكانيكي أو كلاهما قبل وأثناء وبعد دورات التجمد والذوبان، ويمكن تلخيص البروتوكول التجريبي في الشكل التخطيطي رقم 47.



الشكل رقم 47: رسم تخطيطي لبروتوكولات الدراسة التجريبية

### III- خصائص الحجارة المدروسة قبل دورات التجمد

نقدم في هذا الجزء خصائص الحجارة المدروسة قبل إخضاعها للتلف الإصطناعي، وفيما يلي نلخص أهم النتائج المتحصل عليها وفق البروتوكولات المذكورة أعلاه:

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

### III-1- التركيب الكيميائي

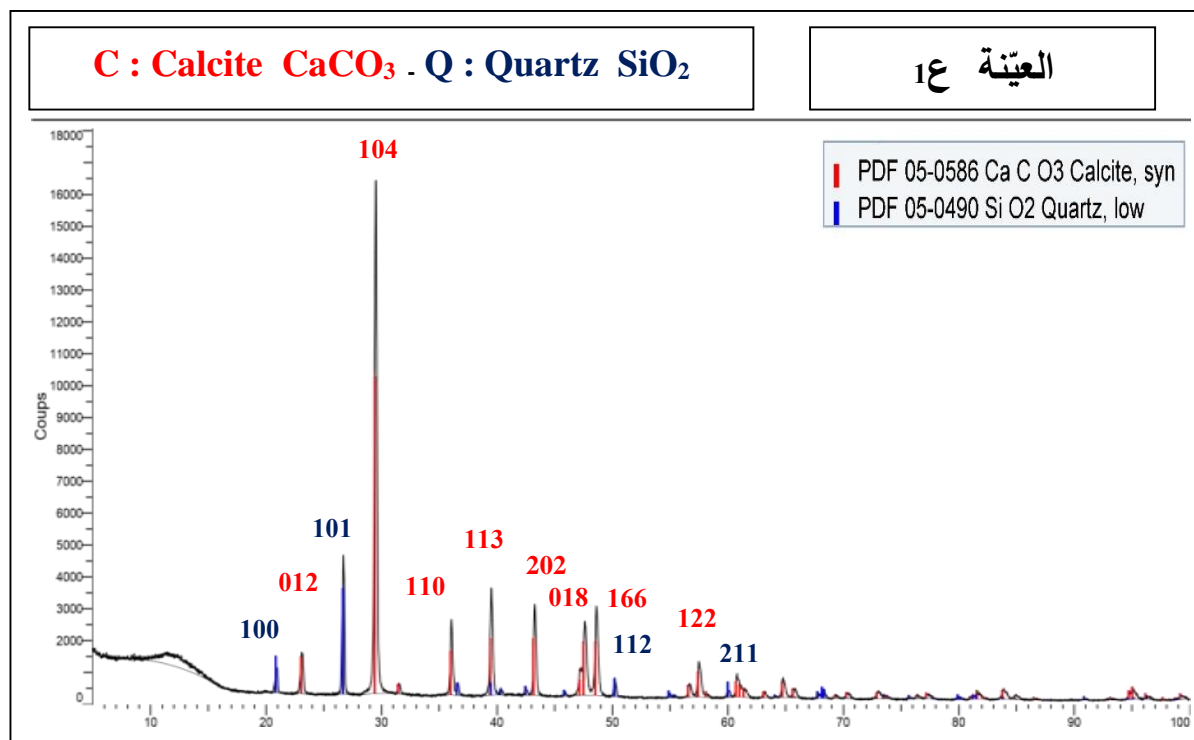
تم إجراء التحليل الكيميائي على مستوى مركز البحث العلمي والتقني للتحاليل الفيزيائية والكيميائية (CRAPC) ببوسماعيل، عام 2018، النتائج مبينة في الجدول رقم 16.

التركيب الكيميائي (%)										العينة
TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	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 16: تبين نتائج التحليل الكيميائي لعينات الحجارة

### III-2 - التركيب المعدنية

تم القيام بتعيين التركيب المعدنية على مستوى مخبر مركز (CRAPC) ببوسماعيل، عام 2018، وفق البرتوكول المذكور أعلاه، النتائج المتحصل عليها لحيود الأشعة السينية للعينات (1ع، 2ع، 3ع) ممثلة في الأشكال (48، 49، 50) على الترتيب، وملخصة في الجدول رقم 17، البيانات التفصيلية مرفقة في الملحق رقم II.

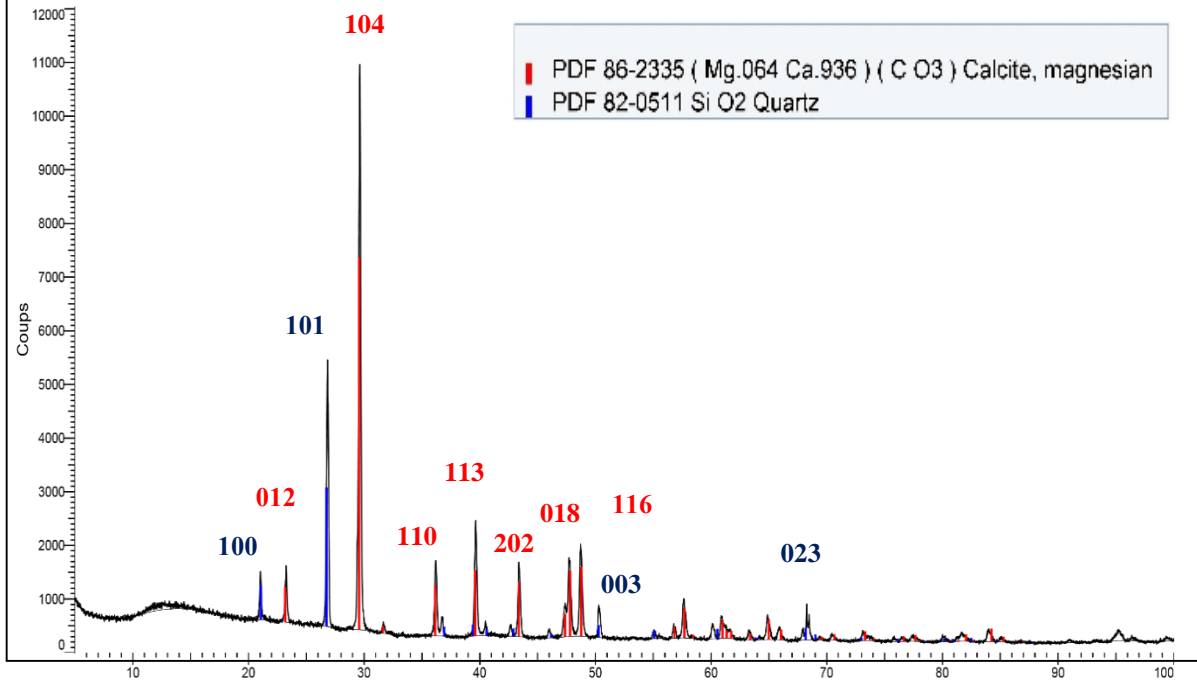


الشكل رقم 48: رسم بياني لمخططات حيود الأشعة السينية للعينة 1ع

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

C : Calcite  $\text{CaCO}_3$  - Q : Quartz  $\text{SiO}_2$

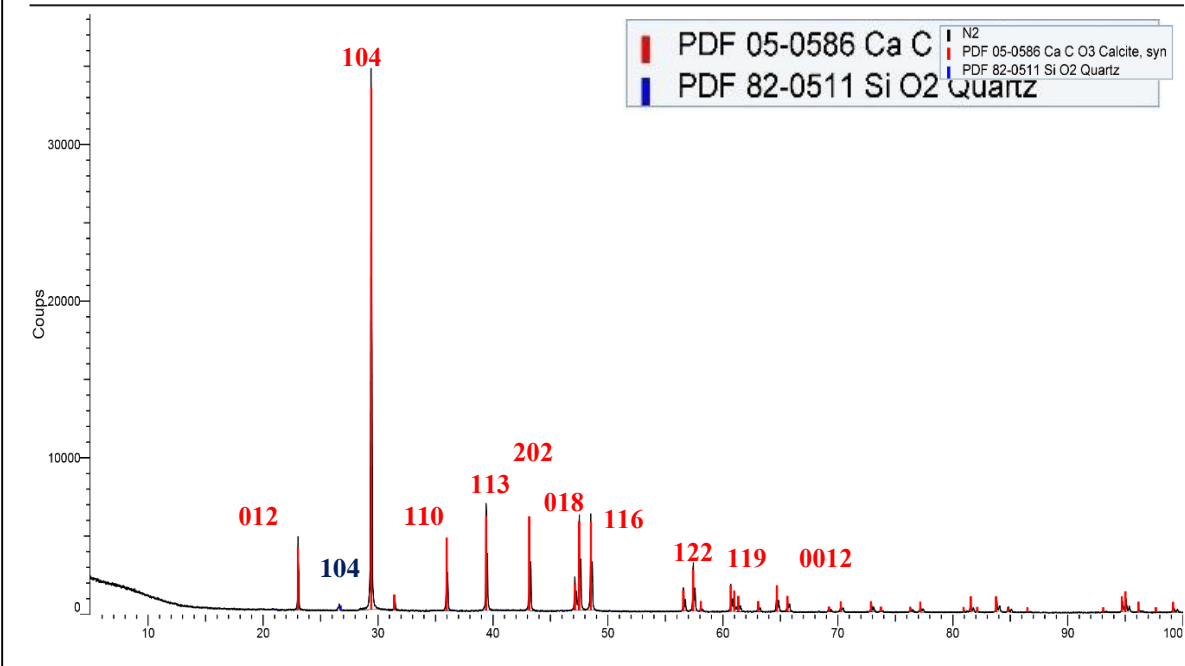
العينة: ع2



الشكل رقم 49: رسم بياني لمخططات حيود الأشعة السينية للعينة ع2

C : Calcite  $\text{CaCO}_3$  - Q : Quartz  $\text{SiO}_2$

العينة ع3



الشكل رقم 50: رسم بياني لمخططات حيود الأشعة السينية للعينة ع3

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

3ع		2ع		1ع		العينة
الكوارتز	الكالسيت	الكوارتز	الكالسيت	الكوارتز	الكالسيت	التكوين المعدني
SiO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	SiO <sub>3</sub>	(Mg 0,64 Ca 93,6)(C O <sub>3</sub> )	SiO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	الصيغة الكيميائية
0,60	99,40	27,30	72,70	15,70	84,30	النسبة المئوية (%)
$\alpha$ كوارتز	$\alpha$ كالسيت	$\alpha$ كوارتز	$\alpha$ كالسيت	$\alpha$ كوارتز	$\alpha$ كالسيت	النوع
PDF82-0511	PDF05-0586	PDF82-0511	PDF86-2335	PDF05-0490	PDF05-0586	المرجع
Hexagonal سداسي	Rhombo. axe H	Hexagonal سداسي	Rhombo.axe H	Hexagonal سداسي	Rhombo. Axe H	نظام التبلور <b>Crystal system</b>
P3121 (152)	R-3c (167)	P3121 (152)	R-3c (167)	P3121 (152)	R-3c (167)	المجموعة الفضائية <b>group Spac</b>
60.08	100.09	60.08<	99.08	60.08	100.09	الوزن الذري (المول)
4,86500	4,98900	4,86500	4,96730	4,91300	4,98900	<b>a</b>
5,44300	17,06200	5,44300	16,96310	5,40500	17,06200	<b>c</b>

الجدول رقم 17: ملخص نتائج التحليل بتقنية حيود الأشعة السينية للعينات الحجرية

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

### III-2-2-2- تحليل نتائج التركيبة الكيميائية والمعدنية

يتضح من نتائج التحاليل الكيميائية المبينة في الجدول رقم 16 أعلاه، أنّ العينات الثلاثة التي تمت دراستها تتكون بشكل أساسي من كربونات الكالسيوم في صورة أكسيد الكالسيوم (CaO) بنسب مرتفعة تتراوح من (42,87 % إلى 54,10 %)، مع نسب متوسطة من السيليس  $SiO_2$  من (1,23 إلى 18,55 %)، ونسب متفاوتة من أكسيد الألومين  $Al_2O_3$  من (0,40 إلى 0,86 %)، وأكسيد الحديد  $Fe_2O_3$  من (0,17 إلى 1,06 %)، وأكسيد المغنيسيوم MgO من (0,30 إلى 0,32 %)، وأكسيد الكبريت  $SO_3$  من (0,11 إلى 0,32 %)، أما بقية العناصر ( $Na_2O, P_2O_5, TiO_2$ ) فتتواجد بنسب ضعيفة جداً تتراوح نسبتها بين 0,01 إلى 0,19 %.

ومن خلال دراسة أنماط حيود الأشعة السينية لهذه العينات والبيانات المرافقة لها الملخصة في الجدول رقم 17 أعلاه، يتبين أنّها تتألف أساساً من طورين بلوريين: الكالسيت في نظام تبلور Rhombo.Axe H، والكوارتز في نظام تبلور Hexagonal، كما يتضح أنّها تتكون بصورة رئيسية من معدن الكالسيت، ونسب معتبرة من الكوارتز، إذ نجد أنّ العيّنة 1 تتكون من الكالسيت بنسبة 84,30 %، ويتضح ذلك من قمم الإنعراج عند الزاوية  $02 (110, 104, 012, 113, 202, 018, 166, 122)$ ، بشدة وسعة كبيرتين، أما الكوارتز فنسبة أقل تقدر 15,70 %، ويظهر ذلك في منحنيات الإنعراج عند الزاوية  $02 (100, 101, 112, 211)$ ، كما هو مبين في (الشكل رقم 48).

أما العيّنة (2ع) فتتكون من معدن الكالسيت الغني بالمغنيزيوم (الدولوميت) وفق الصيغة  $Mg.064 (Ca.936(CO_3))$  بنسبة تصل إلى 72,70 %، ويدل على ذلك قمم الإنعراج التي سجلت عند الزاوية  $02 (110, 104, 012, 113, 202, 018, 116)$ ، التي بشدة وسعة كبيرتين أمام معدن الكوارتز، الذي يوجد بنسبة متوسطة قدرت بـ 27,30 %، وهذا ما تدل عليه منحنيات الإنعراج للأشعة السينية عند الزاوية  $02 (100, 101, 003, 023)$ ، (الشكل رقم 49).

في حين العيّنة (3ع) تتألف من معدن الكالسيت بنسبة كبيرة جداً تبلغ 99,40 %، مع نسبة قليلة جداً من الكوارتز لا تتعدى نسبته 0,6 %، لذا فهي تُعد حجارة كربونية نقية، وهذا ما نلاحظه في الشكل رقم 50 بروز عدة ذروات تخص معدن الكالسيت عند الزاوية



## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

02 (012، 104، 110، 113، 202، 018، 116، 122، 119، 0012) بشدة وسعة كبيرتين، مع وجود ذروة وحيدة أقل حدة من الذروات السابقة تميز معدن الكوارتز عند الزاوية 02 (104).

نستخلص مما سبق أنّ الحجارة المدروسة تمتاز بمحتوى عالي من المعادن الحاملة للكالسيت (كاربونات الكالسيوم والمغنسيوم)، مع نسب متفاوتة من الكوارتز، كما يلاحظ عدم وجود أي قمم للحديد أو أكاسيد أخرى، وهذا راجع لتراكيزها الضعيفة، وتجدر الإشارة إلى أنّ جهاز إنعراج الأشعة السينية لا يمكنه الكشف عن النسب القليلة جداً.

واستناداً إلى ما سبق يمكن تعريف هذه الحجارة بأنّها حجارة كربونية ذات أصل رسوبي، لها تركيب معدني تقريبا متشابه، وهذا ما أكدته التحاليل بتقنية فلورة الأشعة السينية FRX التي بينت غلبت الأكاسيد الكربونية على الأكاسيد السليسية، بمعنى أن المعدن السائد في العينات هو الكالسيت يليه معدن الدلوميت، ثم معدن الكوارتز بنسب أقل، كما تحتوي العينات على بعض الأكاسيد المعدنية مثل الهيماتيت والألومين، إلا أنّ تركيزها ضعيف جداً، وهو ما جعل العينات ذات طبيعة بلورية عالية، وهذا ما دلت عليه تحاليل DRX.

### III-3- نتائج الخصائص الفيزيائية للعينات قبل دورات التجمد والذوبان

نورد فيما يلي أهم نتائج الخواص الفيزيائية للعينات المتحصل عليها قبل إخضاعها لدورات التجمد والذوبان وفق البروتوكولات التجريبية المذكورة أعلاه:

#### III-3-1- الكثافة

نلخص في الجدول رقم 18 نتائج الكثافة المتحصل عليها للعينات المدروسة.

العينات	الرمز	الكتلة الجافة (غ) $M_{Sec}$	الكتلة (غ) $(M_{Sta})$	الكتلة (غ) $M_{Sub}$	الكثافة p (غ/سم <sup>3</sup> )	الكتلة الحجمية (غ/سم <sup>3</sup> )
حجارة كلسية	ع1	375,45	381,70	233,95	2,65	2,55
حجارة البيوكلاست	ع2	350,70	353,40	216,15	2,61	2,56
حجارة التّوف	ع3	128,10	143,05	67,30	2,09	1,65

الجدول رقم 18: تبين نتائج قياس الكثافة للعينات قبل دورات التجمد والذوبان

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

### III-3-2- المسامية الكلية

تمتلك الحجارة التي تمت دراستها مسامية كلية متباينة تتراوح نسبتها ما بين 1,88 % و 21,07 %، النتائج المتحصل عليها مبينة في الجدول رقم 19.

العينة	الرمز	عدد العينات	المسامية الكلية $N_T$ %
حجارة كلسية صلبة	1ع	2	4,16
حجارة البيوكلاست	2ع	2	1,88
حجارة الثوف	3ع	2	21,07

الجدول رقم 19: نتائج قياس المسامية الكلية للعينات قبل دورات التجمد والذوبان

### III-3-3- معامل امتصاص الماء

تعتمد شدة الضرر بفعل الجليد بشكل أساسي على كمية المياه الموجودة داخل العينات، سواء قبل التجمد أو أثناء توسع الجليد، لذا فتحدد نسبة امتصاص الماء للعينات قبل إخضاعها لدورات التجمد والذوبان المسرعة يُعد أمراً بالغ الأهمية، وقد تم تحديدها وفق البروتوكول التجريبي المذكور أعلاه، النتائج المتحصل عليها مدرجة في الجدول رقم 20.

العينة المرجعية	الرمز	متوسط الكتلة الجافة $M_{Sec}$ (غ)	متوسط الكتلة المشبعة $(M_{sat})$ (غ)	متوسط الكتلة الهيدروستاتيكية $M_{sub}$ (غ)	نسبة الإمتصاص ( AB% )
حجارة كلسية صلبة	1ع	375,45	381,70	233,95	1,68
حجارة البيوكلاست	2ع	350,65	353,40	216,15	0,75
حجارة الثوف	3ع	128,05	143,05	67,30	13,28

الجدول رقم 20: نتائج اختبار امتصاص الماء للعينات قبل دورات التجمد والذوبان

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

### III-3-4 تحليل نتائج الخصائص الفيزيائية للعينات قبل دورات التجمد والذوبان

تشير النتائج الخاصة بالكثافة المبيّنة في الجدول رقم 18، أنّ العينات متباينة في كثافتها، فالعينة (1ع) تمتلك أكبر كثافة مقارنةً مع العينات الأخرى إذ تقدر بـ 2,65 غ/سم<sup>3</sup>، تليها العينة (2ع) بكثافة تقدر بـ 2,61 غ/سم<sup>3</sup>، وهذا ما يفسر حالتها التي تبدو صلبة، في حين العينة (3ع) تمتلك أدنى كثافة بـ 2,09 غ/سم<sup>3</sup>، وهذا ما يفسر طبيعتها الضعيفة الهشة.

أما نتائج تحديد المسامية الكلية للعينات المبيّنة في الجدول رقم 19، فتظهر أنّ العينة (3ع) تمتلك أعلى قيم للمسامية مقارنة مع بقية العينات المدروسة، والتي قدرت بـ 21,07 %، مع كثافة تبلغ 2,09 غ/سم<sup>3</sup>، وبالتالي تعد حجارة مسامية، ويرجع هذا الإرتفاع لإمتلاكها شبكة مسام وتجاويف كبيرة الحجم، تسمح لها بملء جميع المسام تقريباً، وهذا يرفع من معدلات تشبع هذه العينات، وبالتالي احتمالية تدهورها بشكل أسرع وأشد من العينات الأخرى، بعد ذلك تأتي العينة (1ع) بمسامية إجمالية منخفضة، قدرت بـ 4,16 %، مع كثافة جيدة تبلغ 2,61 غ/سم<sup>3</sup>، جعلت شبكة مساميتها لا تسمح بملء جميع المسام تقريباً، وهذا هو السبب في عدم التشبع الكلي لهذه العينات، أما في المرتبة الأخيرة فتأتي العينة (2ع) (حجارة البيوكلاست)، بأدنى مسامية كلية والتي قدرت بـ 1,88 %، مع كثافة تبلغ 2,65 غ/سم<sup>3</sup>، وهذا بدوره يمنح لها درجة تشبع منخفضة، ويعود هذا لكثافتها المرتفعة، وحببياتها الناعمة المتماكة بشكل جيد.

وتشير النتائج المتعلقة بقياس خاصية الإمتصاص المبيّنة في الجدول رقم 22، إلى امتلاك العينة (2ع) امتصاصاً منخفضاً لا تتعدى نسبته 0,75 %، مما سيؤدي إلى معدلات تشبع منخفضة مهما طالت مدة التشبع، ومسامية متدنية، ويعود ذلك لكثافتها المرتفعة ولصغر حجم حبيباتها، وطبيعة مادتها اللاّحمة المتمثلة في الكوارتز، وهذا نتج عنه فراغات قليلة نتيجة تراص وتلاحم حبيبتها بشكل جيّد، تليها العينة (1ع) بنسبة امتصاص منخفضة قدرت بـ 1,68 %، وهذا ما يفسر أيضاً مساميتها المنخفضة التي قدرت بـ 4,16 %، أما بالنسبة للعينة (3ع) فهي تعد شديدة الإمتصاص مقارنة مع العينات الأخرى، بنسبة معتبرة تقدر بـ 13,28 %، وهذا ما يفسر مساميتها المرتفعة وتشبعها العالي، وحالتها المتدهورة.

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

ومن المثير للاهتمام أنّ كثافة المادة لها تأثير بالغ الأهمية على جودة خواصها، إذ نستنتج من هذه النتائج أن الحجارة من صنف العينتين (1ع) و(2ع) لديها كثافة نوعاً ما مرتفعة، وهذا منح لها امتصاصاً ومساميةً منخفضةً، وبالتالي تشبعاً منخفضاً، وعلى خلاف ذلك، نجد العيّنة (3ع) لديها كثافة منخفضة لكنها بالمقابل تمتلك امتصاصاً ومساميةً مرتفعةً جداً الأمر الذي منحها تشبعاً مرتفعاً، وهذا يؤدي بنا إلى طرح التساؤلات التالية:

هل ستتأثر هذه الخواص بالجليد؟ و إلى أي مدى تتأثر هذه الخواص؟  
وهذا ما سنحاول الإجابة عليه لاحقاً من خلال اختبارات التجمد والذوبان.

### III-4- الخواص الميكانيكية للعينات قبل دورات التجمد والذوبان

#### III-4-1- تقدير سرعة الموجة فوق الصوتية $V_p$

في سياق البحث ولتقدير الخواص الميكانيكية للعينات الحجرية المدروسة، قمنا بقياس سرعة انتقال الأمواج  $V_p$  الأولية (قبل دورات التجمد) للعينات في المختبر، إلى جانب قياس سرعة انتقال الأمواج  $V_p$  للحجارة المشكلة لهياكل مباني الموقع الأثري من صنف العينات التي تم دراستها في المختبر وفق البروتوكول الموضح أعلاه.

#### III-4-1-1- تقدير سرعة الأمواج فوق الصوتية الأولية للعينات في المختبر

تم تقدير سرعة الأمواج وفق البروتوكول التجريبي المذكور أعلاه، النتائج المتحصل عليها مبينة في الجدول رقم 21.

العينة	الرمز	عدد العينات	الزمن T (بالثانية)	سرعة الموجة $V_p$ (م/ثا)
حجارة كلسية صلبة	1ع	2	15,90	5660,00
حجارة البيوكلاست	2ع	2	14.40	6125,98
حجارة التّـوف	3ع	2	14,30	2448,00

الجدول رقم 21: نتائج قياس سرعة الموجة الصوتية الأولية للعينات الحجرية في المختبر

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

تبين النتائج المتحصل عليها أنّ سرعة الموجة فوق الصوتية للعينات متباينة، إذ تمتلك العيّنة (ع2) أكبر قيم لسرعة موجة مقارنة مع العينات الأخرى بـ 6125,98 م/ثا، تليها العيّنة (ع1) بسرعة تقدر بـ 5660,00 م/سا، وفي الأخير تأتي العيّنة (ع3) (التوف الكهفي) بسرعة موجة تقدر بـ 2448,00 م/ثا، وهذا مؤشر على أنّ هذه العيّنة (ع3) أضعف الحجارة وأدناها مقاومةً، نظراً لإحتوائها على نسبة كبيرة من الفراغات والتجاويف.

### III-4-1-2 مؤشر الإستمرارية

ترتبط قيم سرعة الموجة  $V_p$  بشكل مباشر بالمسامية الكلية  $N_t$ ، وفي نفس الوقت بمؤشر الإستمرارية  $IC$ ، الذي يقصد به النسبة بين سرعة الموجة  $V_p$  المقاسة للعين على السرعة النظرية للموجة المحسوبة من تركيبها المعدني، وحسب Charlotte Walbert<sup>(1)</sup> فإن سرعة الموجة  $V_p$  في معدن الكالسيت تقدر بـ 6320 م/ثا<sup>1</sup>، أما في معدن الكوارتز فتقدر بـ 6050 م/ثا<sup>1</sup>.

وبناء على ذلك، تكون السرعة النظرية للعينّة (ع1) تساوي 84,30% من سرعة الموجة  $V_p$  في الكالسيت 6320 م/ثا<sup>1</sup>، و 15,70% من سرعة الموجة  $V_p$  في الكوارتز تقدر بـ 6050 م/ثا<sup>1</sup>، أما السرعة النظرية للعينّة (ع2) فتساوي 72,70% من سرعة الموجة  $V_p$  في الكالسيت، و 27,30% من سرعة الموجة  $V_p$  في الكوارتز، في حين السرعة النظرية للعينّة (ع3) تساوي 99,40% من سرعة الموجة  $V_p$  في الكالسيت، و 0,60% من سرعة الموجة  $V_p$  في الكوارتز.

فضلاً عن ذلك، فإن مؤشر الإستمرارية هذا يتيح لنا حساب النسبة المئوية لمسامية المسام  $n_p$ ، ومسامية الشقوق  $n_f$ <sup>(2)</sup>، وبذلك تقدير درجة صلابة الحجارة.

وبعد تحديد سرعة الموجة فوق الصوتية  $V_p$  للعينات المدروسة في المختبر بطريقة القياس المباشرة وفق البرتوكول المذكور أعلاه، قمنا على إثرها بحساب مؤشر الإستمرارية

(1) - Charlotte Walbert, Op.cit ,pp 67, 68.

(2) - Ipid ,p 68.



## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

للعيّنات الثلاثة، وتقدير نسبة كل من مسامية المسام، ومسامية الشقوق لهذه العيّنات قبل إخضاعها لدورات التّجمد والذّوبان، النّتائج المتحصّل عليها مدرجة في الجدول رقم 22.

مسامية الشقوق N <sub>f</sub> (%)	مسامية المسام N <sub>p</sub> (%)	المسامية الكلية N <sub>t</sub> (%)	مؤشر الإستمرارية I <sub>c</sub> (%)	عدد العيّنات	العينة المرجعية	
					الرّمز	تسمية الحجارة
0,16	4,00	4,16	90,16	2	1ع	حجارة كلسية صلبة
0,05	1,53	1,88	98,07	2	2ع	حجارة البيوكلاست
1,35	19,72	21,07	38,74	2	3ع	حجارة التوف

الجدول رقم 22: نتائج حساب مؤشر الإستمرارية ونسب مسامية المسام ومسامية الشقوق

من خلال نتائج هذا الجدول يتبيّن أن العيّنتين (1ع) و(2ع) تقدمان نمط مسامية مسام مختلف تقدر بـ (4,00، و1,53%) وهي أكبر من مسامية الشقوق المقدرة بـ (0,16، و0,05%) على الترتيب، في حين العينة (3ع) تظهر جزءاً مهماً من مسامية الشقوق قدرت بـ 1,35% ومسامية المسام المقدرة بـ 19,72%، لذا فهي تملك أكبر نسبة مسامية شقوق مقارنة مع العيّنات الأخرى، وهذا مؤشر على إحتواء العينة (3ع) على شقوق أولية معتبرة، أما العيّنتين (1ع) و(2ع) فيمكن القول بأنهما يمتلكان شقوقاً مجهرية لكن بنسب متدنية جداً.

### III-1-4-3- تقدير سرعة الأمواج فوق الصّوتية للحجارة في الموقع

بغرض معرفة الخواص الميكانيكية للحجارة المشكلة لهياكل مباني الموقع الأثري لجميلة دون إحداث أي أضرار بها، قمنا بقياس سرعة الأمواج فوق الصّوتية على عدد من الكتل الحجرية لأهم معالم هذا الموقع الأثري من نفس صنف عيّنات الدّراسة، بإتباع البرتوكول المذكور أعلاه، وفق أساليب قياس مختلفة، غير مباشرة، ونصف مباشرة في الحالة التي لم نتمكن فيها من تطبيق طريقة القياس المباشرة، وذلك بسبب وضعية الكتل

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

الحجرية، وحجمها، وعدم استواء أسطحها بسبب آثار الصّقل والتّشذيب، أو وجود التّشقّقات، ومن جهة أخرى لقصر كوابل محولات الطّاقة، وحرصاً على الحصول على دقة القياس وأحسن النتائج يستحسن أن يكون سطح العينات مستوي خالي من العيوب لوضع محولات الطّاقة، فضلاً عن إختيار الحجارة يكون في مواضع مختلفة من البناء (وسط، وزوايا الجدران) أنظر الملحق رقم III، النتائج المتحصل عليها ملخصة في الجدول رقم 23.

الزّمن T بالثانية	سرعة Vp (م/ثا)	طريقة القياس	قياس العينة	رمز الحجارة	تسمية المعلم
130.20	4320	نصف مباشرة	84 x70x45	1ع	الحمامات الكبرى
155.00	4675	مباشرة	45x77x45	2ع	
160.90	2581	غير مباشرة	Lx25x10	3ع	
150.00	2466	مباشرة	45x50x100	1ع	قوس كركلا
150.20	4660	مباشرة	87x107x70	1ع	
128,60	5443	مباشرة	70x28x100	2ع	
56,90	2812	غير مباشرة	Lx60x100	1ع	معبد العائلة السيفيرية
154,90	4516	نصف مباشرة	56x67x95	2ع	
140,60	4355	مباشرة	70x70x100	2ع	
70,30	6025	نصف مباشرة	60x50x90	1ع	المسرح
63,40	2524	نصف مباشرة	70x60x100	1ع	
063.4	2524	نصف مباشرة	70x70x100	2ع	

الجدول رقم 23 : نتائج قياس سرعة الأمواج الصّوتية للحجارة المتواجدة في الموقع الأثري

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

يتضح من هذه النتائج أنّ سرعة الموجة  $V_p$  متباينة، وذلك حسب نوع الحجارة وحالة حفظها، فقد سجلت أقصى قيمة لها في الحجارة من صنف العينة (2ع) بسرعة تقدر بـ 5443 م/ثا، على مستوى الحجارة المشكلة لقوس كركلا، والمعبد السيفيري، تليها الحجارة من صنف العينة (1ع) بسرعة تقدر بـ 4662 م/ثا على مستوى المعبد السيفيري والمسرح.

أما الحجارة من نوع التّوف الكهفي (3ع) فنظراً لتدهورها بشكل كبير، وعدم وجود عينات ذات حجم كبير، كون أغلبها يوجد على هيئة دبش لكنها بحالة متدهورة نوعاً ما، فقد اخترنا حجارة ذات مقاييس (10x25 سم) تتواجد على مستوى إحدى جدران قاعات الحمامات الكبرى، حيث سجلت أدنى سرعة للموجة قدرت بـ 2551 م/ثا.

ومن خلال ما سبق يمكن القول بأنّ الكتل الحجرية المتواجدة في الموقع الأثري من صنف العينات (1ع) و(2ع)، لديها خصائص ميكانيكية جيّدة مقارنةً مع الحجارة من صنف العينة (3ع) التّوف الكهفي، وهذا يتوافق مع حالة تدهور الكتل الحجرية في الموقع والمحجر، ومن جهة أخرى تتوافق مع النتائج المتحصل عليها في المختبر.

### III-4-2- تقدير المقاومة الميكانيكية للعينات للضغط أحادي المحور في المختبر

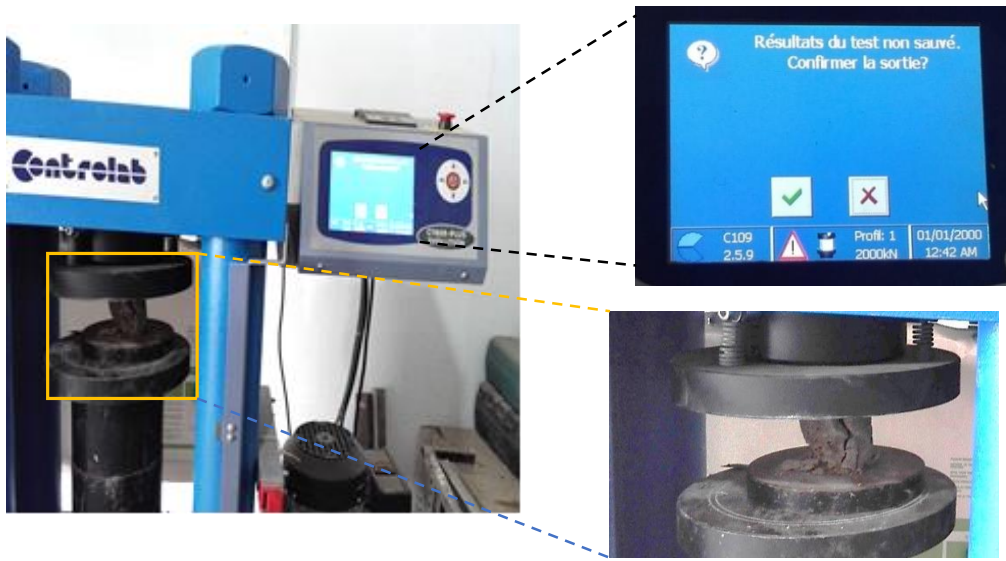
تم إجراء اختبارات تحديد المقاومة الميكانيكية للضغط أحادي المحور في المختبر على العينات الحجرية وفق البرتوكول التجريبي المذكور أعلاه، والذي أسفر على النتائج المبينة في الجدول رقم 24.

العينة	الوزن (غ)	الإرتفاع (مم)	القطر (مم)	المساحة (مم <sup>2</sup> )	القوة القصوى F(kN)	مقاومة الضّغط RC (MPa)
1ع	385,90	90	42	1385,44	88,627	55,73
2ع	369,00	85	42	1385,00	55,60	47,88
3ع	168,10	50	42	5278,34	---	---

الجدول رقم 24: ملخص نتائج قياس مقاومة الضّغط أحادي المحور

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

تدل نتائج اختبار مقاومة الضَّغط المبيَّنة في هذا الجدول أنّ العينات تتباين في درجة صلابتها، وقد سجلت العينتين (1ع) و(2ع) أعلى مقاومة للضَّغط والتي قدرت على التّوالي ( 55,73 و47,88 MPa)، في حين العينات الحجرية (3ع) من نوع التّوف الكهفي لم تسجل أي قيمة لمقاومة الضَّغط  $R_c$  بالرَّغم من تحطم العينات كما هو موضح في الصّورة رقم 102، وهذا يدل على أنّ هذه الحجاره ضعيفة جدًّا وغير مقاومة للتلف، وهذا يتوافق مع حالة حفظ هذا الصّنف من الحجاره في الموقع الأثري وفي المحجر.



الصورة رقم 102: تبيّن عملية قياس الضَّغط أحادي المحور على عينة التّوف الكهفي

### III- 3-4- تقدير المقاومة الميكانيكية للحجارة في الموقع الأثري

بهدف تقدير درجة صلابة الحجاره المكونه لهياكل مباني الموقع الأثري لجميلة، لكن دون إحداث أي أضرار بها، قمنا باستخدام جهاز قياس الصّلابه يعرف باسم السّكليرومتر، وفق الأسلوب المبين في الصورة رقم 103، ولقد تم اختيار الكتل الحجرية المقاسة من صنف العينات المستخدمة في التّحاليل المخبرية (حجارة كلسية صلبة، وحجارة البيوكلاست، وحجارة التّوف الكهفي)، وفي حالة حفظ نوعاً ما جيّده، متواجده في أبرز معالم هذا الموقع الأثري (الحمامات الكبرى، قوس كركلا، معبد العائلة السّيفيرية، المسرح)، وفي مواضع مختلفة من البناء (أنظر الملحق رقم III)، وقد أسفر هذا الفحص على التّنتائج المبيّنة في الجدول رقم 25.

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

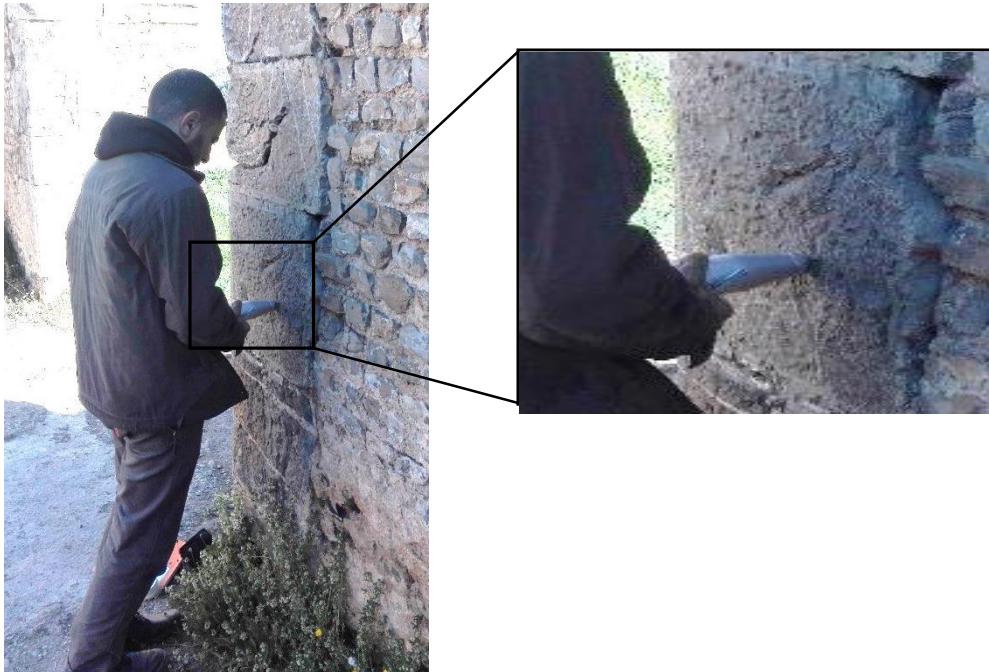
متوسط الضغظ	مقاومة الضغظ MPa		الواجهة المقاسة		قياس العينة	رقم الحجارة	العينة	المعلم
	واجهة 4	واجهة 3	واجهة 2	واجهة 1				
45,00	48,67	44,33	44,67	42,33	78x50x56	ح 1	ع 1	الحمائمات الكبرى
38,75	48	30	44	33	75x60x47	ح 2	ع 1	
9		9	/	10	28x8x25	ح 3	ع 3	
55,83	58,67	62	50,67	52,0	44x68x58	ح 4	ع 2	
56,33	64	58	53,33	50,0	60x68x59	ح 5	ع 2	
56,58	58,67	64	50,67	53	100x50x45	ح 1	ع 2	قوس كركلا
52,17	55	56,33	48,00	49,33	70x107x87	ح 2	ع 2	
46,92	48	50,33	44	45,33	100x28x70	ح 3	ع 1	
46,52	48,57	48,48	44,57	44,48	95x67x56	ح 1	ع 1	مجدب العائلة السيفيرية
34,50	/	34	/	35	Lx100x60	ح 2	ع 1	
50,50	/	54	/	47	100x70x70	ح 3	ع 1	
10	/	10		12	20x10x25	ح 4	ع 3	
51,50	/	55	/	48,0	90x50x60	ح 1	ع 1	المسرح
51,50	/	55	/	48,0	Lx52x90	ح 2	ع 2	
55,83	55	55	48,0	52	58x50x56	ح 3	ع 1	
45,00	48,67	44,33	48,0	48,0	57x50x42	ح 4	ع 1	

الجدول رقم 25: نتائج قياس مقاومة الضغظ بجهاز الشكليرومتر على حجارة الموقع الأثري



## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

تشير نتائج هذا الفحص المبيّنة في الجدول رقم 25 أنّ الحجارة المشكلة لهياكل مباني الموقع الأثري لجميلة على إختلاف أنواعها، ومواضعها في البناء، وحالة حفظها، أنّها تتباين في مقاومتها الميكانيكية، إذ نجد الحجارة من صنف العيّنة (2ع)، تتميز بمقاومة ميكانيكية جيدة تتراوح من (51,50 إلى 56,58 MPa)، تليها في المرتبة الثانية الحجارة من صنف العيّنة (1ع) الحجارة الكلسية الصلبة بمقاومة متوسطة تتراوح من (34,50 إلى 51,50 MPa)، في حين الحجارة من نوع التوف الكهفي (3ع) سجلت أدنى مقاومة لا تتعدى 9,00 MPA، هذه النتائج تتوافق مع النتائج المتحصل عليها في المختبر، والتي أظهرت أنّ الحجارة من نوع (1ع) و(2ع) ذات صلابة ومقاومة جيّدة، في حين الحجارة من نوع (3ع) التوف الكهفي هي حجارة ضعيفة وهشة، لذا أقتصر استخدامها ككتل حجرية ودبش في الجدران الفاصلة بين الفضاءات في الحمامات الكبرى، أو كمادة للحشو في الأسقف والأقواس والأقبية، وذلك نظراً لخفة وزنها، أما الجدران الخارجية فقد أُستخدمت فيها الحجارة الكلسية الصلبة التي تتميز بصلابة ومقاومة جيّدة، ورغم ذلك فقد لاحظنا العديد من مظاهر التدهور من تقشر لطبقاتها السطحية فضلاً عن التشققات والتجزّوات والتصدعات والإنفصال والإنفصام نتيجة تعرضها للعوامل المناخية.



الصورة رقم 103: قياس مقاومة الصلابة للحجارة على مستوى الحمامات الكبرى بالسكليرومتر

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

### III-5- العلاقة بين البنية الجوهريّة والخواص الفيزيوميكانيكية الأولية للحجارة

بالرغم من تشابه التركيب المعدني لهذه الحجارة إلى حدّ كبير، إلاّ أنّه توجد اختلافات نسبية في حجم وشكل الحبيبات المكونة لها، ودرجة ترابطها وتلاحمها، مما نتج عنه تشكل بنية جوهريّة مميزة لكل نوع من هذه الحجارة، والتي منحنتها خواص فيزيائية، وأداء ميكانيكي مُتباين، ويمكن إجمال أهم الخصائص الفيزيائية والميكانيكية الأولية للعينات قبل إخضاعها لدورات التّجمد والذّوبان في الجدول رقم 26.

العينات			نوع الإختبار
3ع	2ع	1ع	
374,50	350,65	381,70	وزن العينات بـ(غ)
2,09	2,61	2,65	الكثافة (غ/سم <sup>3</sup> )
1,65	2,56	2,55	الكتلة الحجمية (غ/سم <sup>3</sup> )
21,07	1,88	4,16	المسامية الكلية (%)
13,28	0,75	1,68	امتصاص الماء (%)
2448,00	6125,98	5660	سرعة الموجة فوق الصّوتية Vp م/ثا
---	47,88	55,73	المقاومة الميكانيكية (MPa ( R <sub>C</sub> )

الجدول رقم 26: يبين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية الأولية للعينات.

يتضح من نتائج هذا الجدول أنّ العينات متباينة في خواصها الفيزيوميكانيكية، إذّ نجد أنّ الحجارة من صنف العينتين (1ع) و(2ع) تمتلك امتصاصاً ضعيفاً قدرت نسبته بـ (0,75 و1,68%)، ومسامية كلية منخفضة قدرت بـ (4,16 و1,88%) على التوالي، وهذا ما أهلها لإمتلاك مقاومة ميكانيكية للضّغط R<sub>C</sub> جيدة قدرت

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

بحوالي (55,70 و 47,90 MPa)، وسرعة موجة فوق الصوتية أيضاً جيدة قدرت بـ (5660، 6125,98 م/ثا) على التوالي، وعلى النقيض من ذلك، نجد الحجارة من صنف العينة (3ع)، لديها امتصاص مرتفع نوعاً ما قدرت نسبته بـ 13,28%، مما منحها مسامية كلية مرتفعة بلغت نسبتها بـ 21.07%، وبذلك فهي تمتلك تشبعاً عالياً، لكنها في المقابل تتميز بمقاومة ميكانيكية ضعيفة جداً، والدليل على ذلك أنّ جهاز قياس مقاومة الضّغط لم يسجل أي قيمة بالرغم من تدمير العينات، كما سجل قياس الأمواج فوق الصوتية على مستوى هذه العينة (3ع) أدنى سرعة موجة  $V_p$  مقارنة بالعينات الأخرى، حيث قدرت بـ 2448,00 م/ثا.

ومن خلال مقارنة مختلف نتائج الخواص الفيزيوميكانيكية للعينات، من مسامية وامتصاص ومقاومة للضّغط، يتبين وجود علاقة طردية بين الإمتصاص والمسامية والتشبع، حيث كلما ارتفعت نسبة الإمتصاص زادت معه نسبة المسامية ودرجة تشبع الحجارة والعكس صحيح.

أما بين المسامية ومقاومة الضّغط وسرعة الموجة فوق الصوتية  $V_p$ ، فتظهر النتائج وجود علاقة عكسية، بمعنى كلما كانت المسامية مرتفعة كلما انخفض مقدار كل من سرعة الموجة  $V_p$ ، والمقاومة الميكانيكية للضّغط  $R_C$ ، ومؤشر الاستمرارية.

وبشكل عام، نستخلص من خلال دراسة نتائج التحاليل الكيميائية والمعدنية للعينات المدروسة المبينة في الجدولين 16 و 17 أعلاه، ومخططات حيود الأشعة السينية الممثلة في الأشكال رقم 48، 49، 50، أنّ المعدن السائد في الحجارة المدروسة الكالسيت يليه الدولوميت ونسب متفاوتة من الكوارتز، كما يلاحظ عدم وجود أي ذروة للحديد أو أكاسيد أخرى، وهذا راجع لتراكيزها الضعيفة، ويمكن القول بأنّ هذه الحجارة ذات طبيعة كربونية عالية، فضلاً عن ذلك، فقد منحت هذه التركيبة للحجارة خواص فيزيائية وميكانيكية متباينة الجودة، مما أثرت على درجة صلابتها ومقاومتها، وبالتالي على ديموميتها.

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

وقد أظهرت نتائج قياس الكثافة المبيّنة في الجدول رقم 18 قيماً متباينة لعينات الحجارة 1ع، 2ع و3ع والتي قدرت بـ (2,65، 2,61، و2,09 غ/سم) على الترتيب، الأمر الذي يفسر اختلاف خواصها الفيزيوميكانيكية وصلابتها، إذ تشير الفحوصات البتروفيزيائية إلى أنّ العينتين (1ع) و(2ع) تمتلكان أدنى قيم للمسامية والإمتصاص، والذي يرجع بدرجة أولى لكثافتها المرتفعة، ولصغر حجم حبيباتها، وطبيعة ونسبة مادتها اللاّحمة (الكوارتز)، وقلة الفراغات والشقوق، وبالتالي يمكن تصنيفها ضمن الحجارة الصلبة جيّدة المقاومة، في حين العيّنة (3ع) تمتلك أكبر القيم مقارنة مع العينات الأخرى، مما ساهم في إضعاف خواصها الميكانيكية والتي يمكن تصنيفها ضمن الحجارة الهشة ضعيفة الصلابة والمقاومة.

كما دلت الفحوصات الميكانيكية لكل من مقاومة الضّغط أحادي المحور  $R_c$ ، وسرعة الموجة فوق الصوتية  $V_p$  على تباين كبير في درجة المقاومة، إذ تمتلك العينات (1ع) و(2ع) مقاومة جيدة تتراوح بين 55,70 و47,88 MPa، وسرعة موجة مرتفعة، في حين العيّنة (3ع) تمتلك أدنى سرعة موجة، ومقاومة للضّغط  $R_c$  تقريباً منعدمة، ويمكن إرجاع هذا الاختلاف إلى التّغيرات في المسامية، وطبيعة المادة اللاّحمة، حيث يلاحظ تدنى قيم مقاومة الضّغط مع زيادة في كل من قيم المسامية والإمتصاص والتّشعب، والعكس يحدث مع انخفاضها.

وعند مقارنة نتائج التّحاليل الكيميائية والمعدنية والخواص الفيزيائية والميكانيكية نستنتج أنّ العينات التي تحتوي على نسب مرتفعة من الكوارتز تكون لديها صلابة ومتانة جيدة، كما هو مسجل في العينات (1ع) و(2ع)، في حين العينات التي تمتلك نسباً منخفضة من الكوارتز تكون هشة وذات صلابة ضعيفة جداً كما هو الحال في العيّنة (3ع).

ويمكن تفسير ذلك لوجود معدن الكوارتز الذي يمكن اعتباره المادة الرّابطة أو اللاّحمة في هذه الحجارة، وبما أنّه من المعادن الصّلبة الغيّر قابلة للذّوبان بسهولة في الماء، لذا فكلما ارتفعت نسبته في الحجارة كلما زادت صلابتها، والعكس صحيح، وفي المقابل تكون العينات التي تحتوي على نسب مرتفعة من الكالسيت أقل صلابة وأكثر هشاشة كون الكالسيت من المعادن القابلة للذّوبان في الماء.

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

وهذه النتائج تتوافق مع حالة الحجارة في الموقع الأثري وطبيعة تركيبها الكيميائي والمعدني، حيث وفق نتائج التحاليل التي قام بها الباحث عيساوي بوعكاز<sup>(1)</sup> على عينات من حجارة الموقع الأثري لجميلة والتي بينت أنها تتكون من الكالسيت بنسب كبيرة والكوارتز بنسب متفاوتة.

وهذا يفسر مظاهر التلف المتعددة على حجارة الموقع الأثري من صنف هذه العينات خاصة العينات (ع3) (التوف الكهفي) التي تعرضت لمظاهر الإنحلال والتآكل أكثر من الأصناف الأخرى من الحجارة (ع1) و(ع2)، والتي تعرضت بشكل كبير للتشقق والإنفصال والتجزؤ، وتشكل أخاديد على الأسطح الأفقية وحتى العمودية.

### VI- خصائص الحجارة بعد دورات التجمد والذوبان

يمكن معرفة وتقييم الأضرار التي يحدثها الجليد على الحجارة سواء على المستوى الداخلي أو الخارجي وذلك بالإعتماد على أسلوبين من التقييم:

- التقييم أو الفحص البصري؛

- تقييم التغيرات التي تحدث للخواص الفيزيائية والميكانيكية.

### VI- 1- التقييم البصري

يُعد التقييم البصري خطوة أولية لتقدير حالة العينات من حيث سلامتها أو ظهور التشققات، فوجود مثل هذه المظاهر يُعد دليلاً على تدهور هذه العينات، ولتقدير درجة ضرر العينات، يعتمد على مقياس الضرر المحدد وفق المعيار NF EN 12371(2010)<sup>(2)</sup> الخاص بتحديد المقاومة للحجارة الطبيعية للجليد، والذي يضع خمسة مستويات من التدهور، وتعتبر العينات متدهورة إذا بلغت المستوى الثالث فما فوق، كما هو مبين في الجدول رقم 27.

(1)- عيساوي بوعكاز، طرق حفظ وصيانة مواد بناء الموقع الأثري جميلة "كويكول" حالة الحجارة الكلسية، رسالة ماجستير في الصيانة والترميم، جامعة الجزائر-2009، ص ص 109-114.

(2) - Norme européenne EN 12371, méthodes d'essai pour pierres naturelles - détermination de la résistance au gel, comité européen de normalisation(CEN), Bruxelles, 2010, p10.



## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

الرقم	مظاهر الضرر	درجة الضرر	حالة العينة
1	العينة سليمة	0	جيدة
2	الحد الأدنى من التلف (دوران طفيف للحواف والزوايا) لا تؤثر على سلامة العينة	1	تدهور بسيط
3	شق واحد أو بعض الشقوق الصغيرة (عرض $>0,1$ مم)، أو انفصال العينة إلى شظايا صغيرة الحجم ( $>30$ مم <sup>2</sup> )	2	متدهورة
4	شق أو عدة شقوق، ثقب، أو انفصال شظايا كبيرة أكبر من تلك المحددة في الملاحظة رقم 2، أو تدهور المواد على مستوى العروق، أو تظهر على العينة علامات التفكك والانهيار.	3	تدهور شديد
5	إحتواء العينة على تشققات كبيرة، إنقسام عينة الإختبار إلى جزئين أو أكثر أو تدمير العينة بشكل كلي	4	العينة مدمرة

الجدول رقم 27: المقياس البصري لتقييم تأثير دورات التجمد والذوبان على الحجارة (1)

بعد الفحص البصري للعينات من كل الجوانب عقب إخضاعها لدورات التجمد والذوبان، يتضح أنها تعاني من أضرار مختلفة، منها ما هي ظاهرة للعيان يمكن تمييزها بسهولة بالعين المجردة، ومنها غير ظاهرة لا يمكن الكشف عنها إلا من خلال الفحص المجهرى، أو من خلال تقدير التطورات التي حدثت لخواصها الفيزيائية والميكانيكية.

بالنسبة للعينات (1ع)، تظهر بشكل عام سليمة، إلا أنه يلاحظ بداية ظهور شقوق دقيقة باتجاهات مختلفة، لكنها متمركزة خاصة في الحواف، كما يلاحظ تشكّل فجوات صغيرة على مستوى العروق نتيجة انفصال حبيبات الكالسيوم المشكّلة لها (الصورة رقم 104).

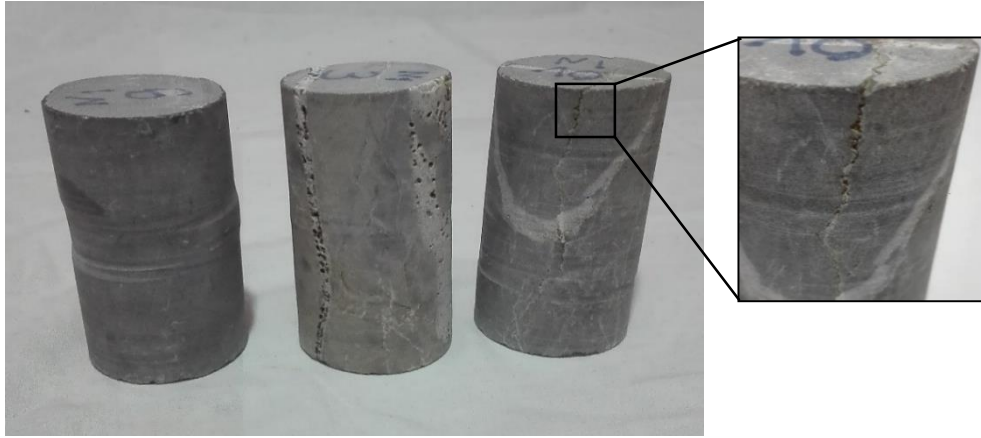
أما بالنسبة للعينات (2ع) فيلاحظ بقاء بعضها سليمة، غير أنه في بعضها الآخر يسجل تشكّل شقوق شعرية دقيقة جداً، وتوسع بعض الشقوق ليصل لبعض المليمترات، خاصة في حواف العينات، كما يلاحظ تشكّل ثقب صغيرة نتيجة انفصال أجزاء

(1) -Ipid,p10 .

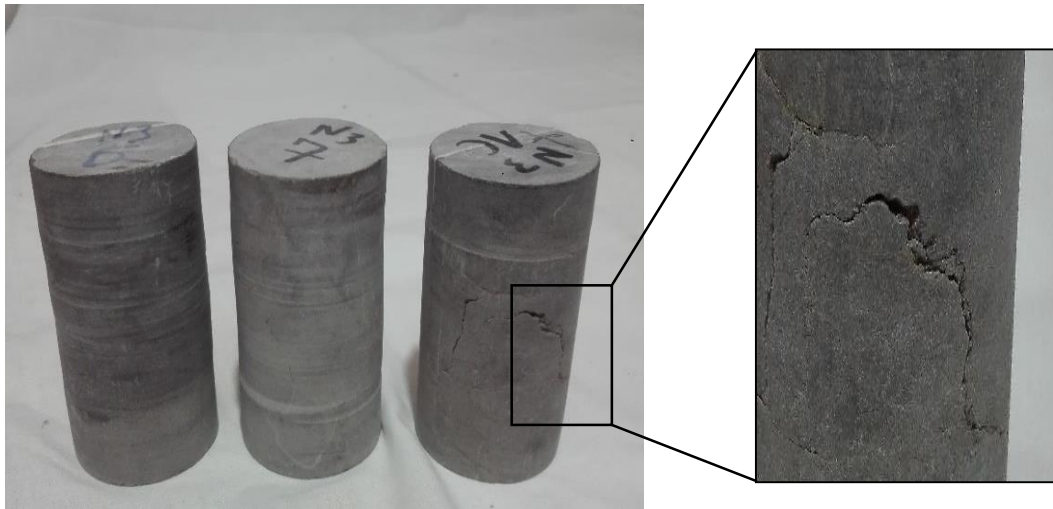
## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

صغيرة جداً من الحجارة، بالإضافة إلى ذلك، يلاحظ على مستوى العروق تشكّل فتحات صغيرة جداً نتيجة انفصال حبيبات الكالسيت كما يظهر في الصورة رقم 105.

في حين العينات الحجرية (ع3) التوف الكهفي، تُظهر بعض العينات منها إتساع فجواتها بشكل كبير، نتيجة تفكك وانفصال ونزوح الحبيبات التي كانت تملؤها، وفي بعضها الآخر يسجل انفصال جزء من العينات على شكل مثلث (سمك 1 سم، وطول 3 سم، وعرض 1,5 سم)، أما في بعض العينات فيلاحظ إنقسامها إلى عدة أجزاء وتفككها وتدميرها بشكل كامل (الصورة رقم 106).

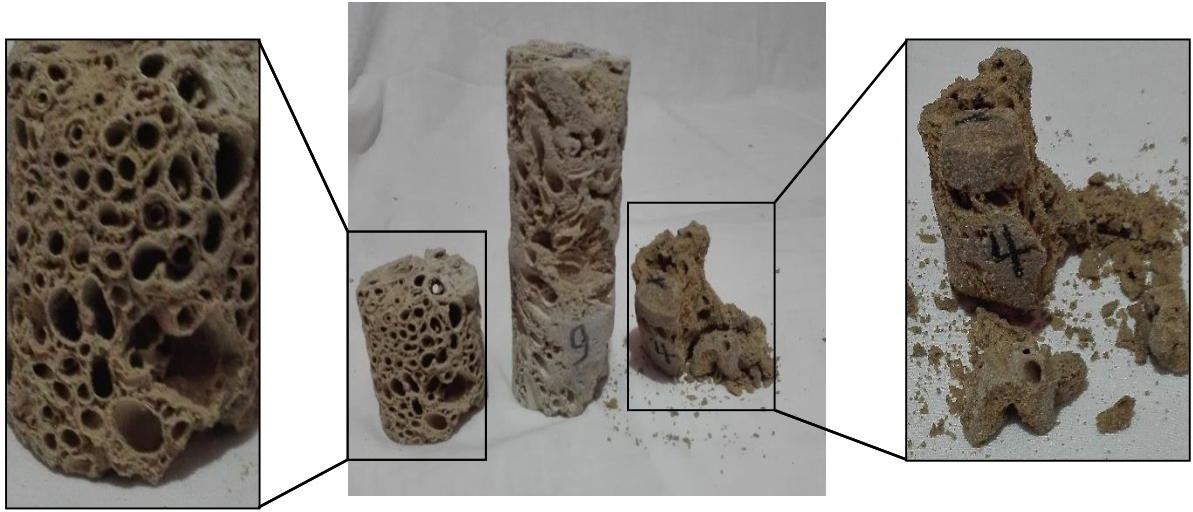


الصورة رقم 104: تبيّن الضّرر البصري للعيّنة ع1 بعد التّعرض لدورات التّجمد والذّوبان



الصورة رقم 105: تبيّن الضّرر البصري للعيّنة ع2 بعد التّعرض لدورات التّجمد والذّوبان

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي



الصورة رقم 106: تبين الضرر البصري للعيّنة ع3 بعد التّعرض لدورات التّجمد والذّوبان

نستخلص مما سبق أنّ العيّنات (1ع) و(2ع) لا تقدمان أيّ ظواهر تدهور كبيرة واضحة حتى بعد 14 دورة، بل تظل سليمة نوعاً ما، إلّا أنّه يسجل ظهور بعض التّشقّقات السّطحية، فحسب مقياس الضرر المبين في الجدول رقم 27 فهي تدخل ضمن مستوى التّدهور رقم 2، أما بالنّسبة للعيّنة (3ع) (التّوف الكهفي)، فيلاحظ حدوث تفكّك حبيبي في بعض العيّنات مع اتّساع التّجاويف، لكن بالرغم من ذلك لا تظهر عليها أيّ تشقّقات، غير أنّه في البعض الآخر من هذه العيّنات يلاحظ أنّها تفكّكت وتدمرت بشكل كامل، وعليه يمكن القول بأنّها تدخل ضمن مستوى التّدهور رقم 3، وبذلك تعدّ حجارةً متدهورةً جداً.

### VI-2- تقييم الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للعيّنات بعد دورات التّجمد والذّوبان

لمعرفة التّأثير الذي يحدثه الجليد على المستوى الداخلي للحجارة يتم من خلال تقدير نسب التّطورات أو التّغيّرات التي حدثت لخواصها الفيزيائية والميكانيكية بعد دورات التّجمد والذّوبان، ويمكن إجمال أهمّ التّطورات فيما يلي:

### VI-2-1- الخصائص الفيزيائية للعيّنات بعد دورات التّجمد والذّوبان

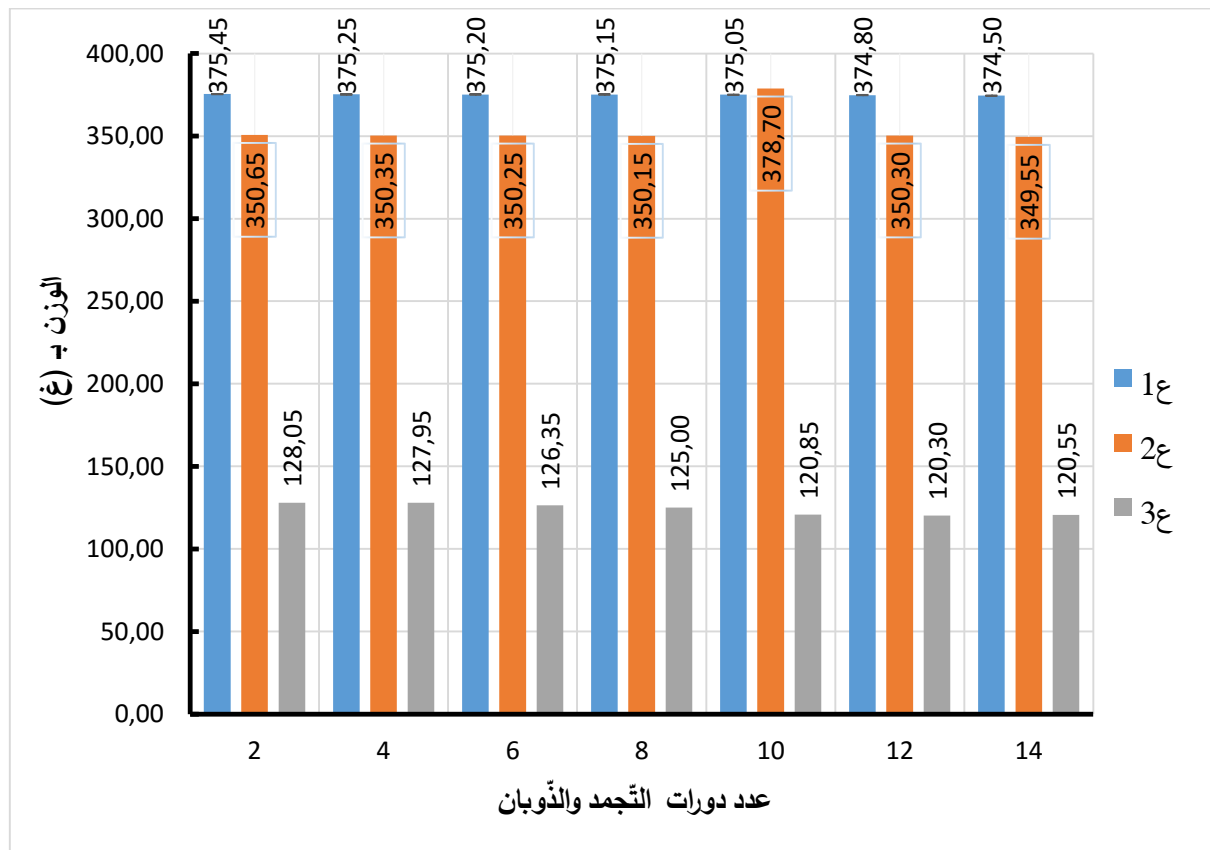
نلخص فيما يلي أهمّ نتائج الخواص الفيزيائية للعيّنات بعد دورات التّجمد والذّوبان:

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

### VI-1-1-2- تأثير دورات التجمد على فقدان الكتلة

يُعد تقدير فقدان الكتلة أو الوزن أحد أبرز المعايير المتبعة لمعرفة مدى التدهور الذي يصيب الحجارة بفعل الجليد، إذ يتم حسابه عن طريق تقدير فرق الوزن للعينات قبل وبعد إخضاعها لدورات التجمد والذوبان، نتائج وزن العينات بدلالة دورات التجمد والذوبان ممثلة في الشكل رقم 51، والذي يتبين منه أنّ أعلى نسبة فقدان حصلت للعينات ابتداءً من الدورة 12 وحتى 14، وأدنى فقدان للوزن حصل للعينات ع2، بعدها تأتي العينة ع1، وفي الأخير العينة ع3.

وهذا يدل على أنّ عملية التجمد والذوبان لها تأثير كبير على العينات لكن بدرجات متفاوتة، ولمعرفة نسبة فقدان الوزن للعينات يتم مقارنة هذه القيم مع قيم وزنها الأولي كما مبين في الجدول رقم 28.



الشكل رقم 51: بيّن التغيرات في كتلة العينات بدلالة دورات التجمد والذوبان

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

العينة	وزن العينة قبل التجمد (غ)	وزن العينة بعد التجمد (غ)	نسبة التغير بالنقصان (%)
1ع	381,70	374,50	1,89 (-)
2ع	350,65	349,55	0,31 (-)
3ع	128,05	120,55	5,86 (-)

الجدول رقم 28: يبين نسبة التغير في وزن العينات قبل وبعد دورات التجمد والذوبان

يتبين من هذه النتائج أنّ العينات عرفت تغييراً واضحاً في الوزن لكن بدرجات متفاوتة، فقد سجلت العينة (3ع) أكبر نسبة فقدان للوزن والتي قدرت بـ 5,86% مقارنة مع وزن العينة قبل دورات التجمد والذوبان، تليها العينة (1ع) بنسبة فقدان تقدر بـ 1,89%، أما في المرتبة الأخيرة فتأتي العينة (2ع) بنسبة فقدان متدنية قدرت بـ 0,31%.

وعليه يمكن القول بأنّ العينات تأثرت بدورات التجمد والذوبان لكن بدرجات متفاوتة، فالعينة 3ع (الثوف الكهفي) تُعد أكثر الحجارة تأثراً وتدهوراً مقارنة بالعينات الأخرى (1ع) و(2ع)، كما ترتبط نسبة الفقدان هذه بدرجة صلابة الحجارة وحالة حفظها من جهة، ومن جهة أخرى بعدد وشدة ومدة دورات التجمد والذوبان.

### VI-2-1-2- تأثير دورات التجمد والذوبان على الكثافة

تشير نتائج قياس الكثافة للعينات بعد إخضاعها لدورات التجمد والذوبان المبيّنة في الشكل رقم 52، أنّ الكثافة إزدت بعد عدد من دورات التجمد والذوبان، غير أن هذه الزيادة تختلف حسب صنف الحجارة وطبيعة تكوينها المعدني وخواصها الفيزيائية فضلا عن الميكانيكية، فبالنسبة للعينة (1ع) يلاحظ أنّ الكثافة تضاءلت في الدورة الرابعة لتصل إلى 2,55 غ/سم<sup>3</sup>، ثم بدأت في الزيادة بعد الدورة السادسة إلى أنّ تصل إلى أقصى قيمة لها بـ 2,65 غ/سم<sup>3</sup> في الدورة 14، لكن يلاحظ أنّ الكثافة لم تتغير مقارنة مع كثافتها الأولية.

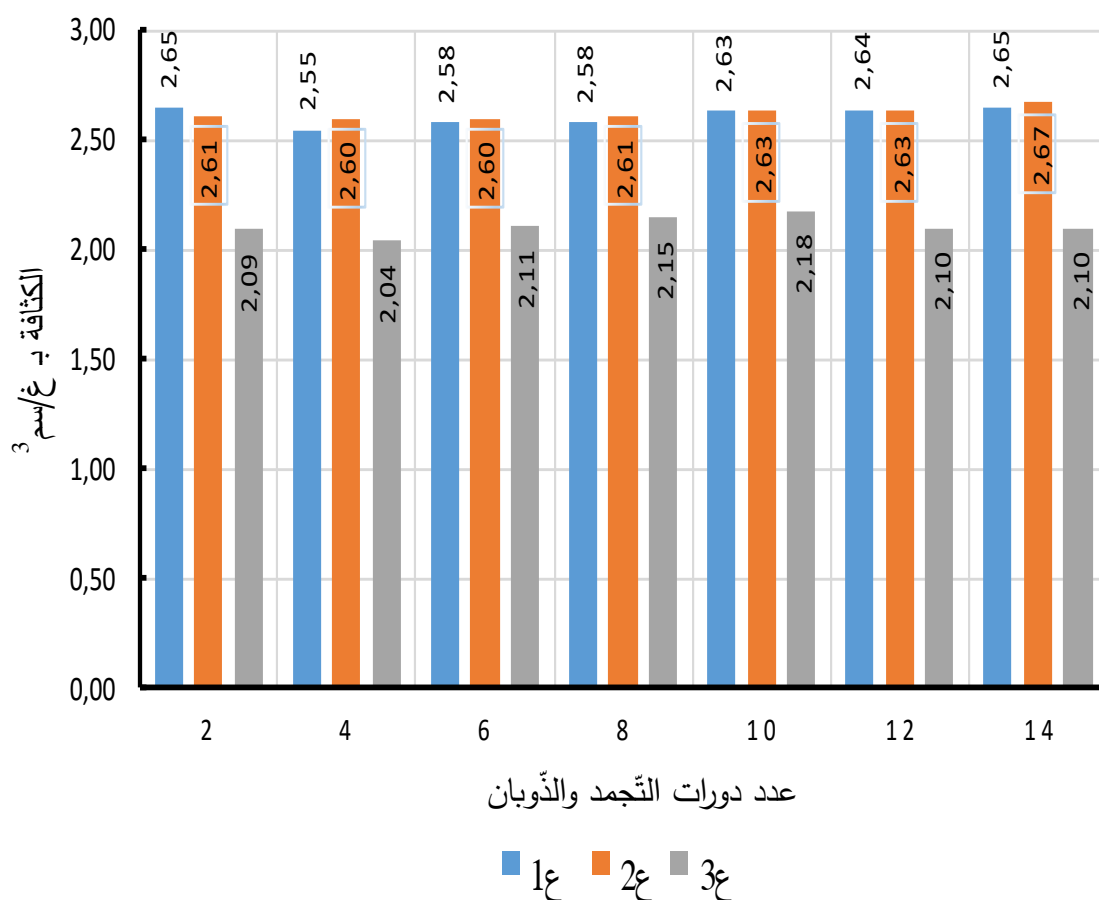


## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

في حين العينة (2ع) تناقصت كثافتها في الدورة (4 و 6) لتصل إلى 2,60 غ/سم<sup>3</sup>، ثم تبدأ في الزيادة بعد الدورة 8 لتصل إلى أعلى قيمة لها في الدورة 14 بـ 2,67 غ/سم<sup>3</sup>.

أما بالنسبة للعينة (3ع)، فقد حصل نفس الشيء، حيث تناقصت في الدورة 4 من 2,09 إلى 2,04 غ/سم<sup>3</sup>، ثم بدأت في الزيادة بعد الدورة 6 إلى أن وصلت إلى أعلى قيمة لها عند الدورة 10 بـ 2,18 غ/سم<sup>3</sup>، ثم تنخفض في نهاية الدورة 14 لتصل إلى 2,11 غ/سم<sup>3</sup>.

أما بخصوص نسبة التغير فعند مقارنة كثافة العينات المتحصل عليها قبل وبعد نهاية دورات التجمد والذوبان، النتائج مبينة في الجدول رقم 29، والذي يتضح منه أن العينة (2ع) سجلت أكبر زيادة مقارنة مع العينتين الباقيتين بنسبة تقدر بـ 2,30 %، تليها العينة (3ع) بنسبة بزيادة تقدر بـ 0,96 %، بينما تأتي في المرتبة الأخيرة العينة (1ع) حيث لم تتغير كثافتها تقريباً.



الشكل رقم 52: يبين تطور الكثافة للعينات بدلالة دورات التجمد والذوبان

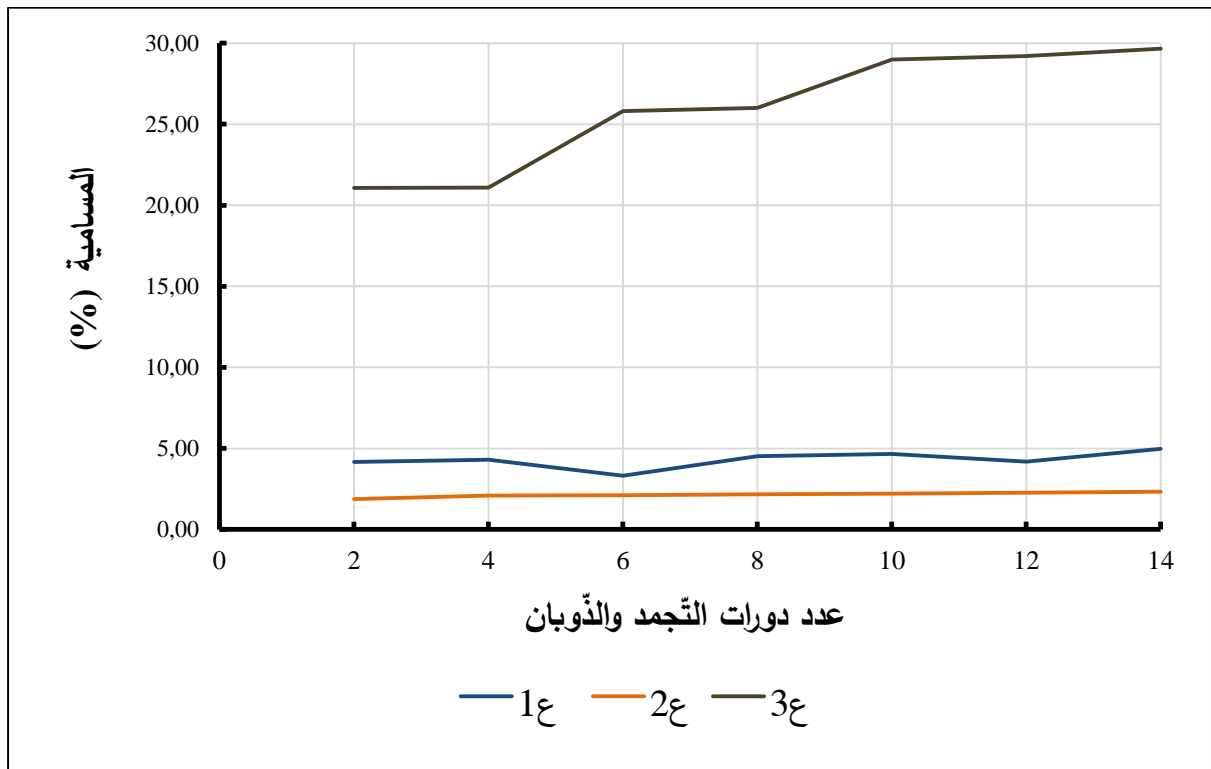
## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

نسبة التغير بالزيادة (%)	متوسط الكثافة (غ/سم <sup>3</sup> )		العينة المرجعية
	بعد التجمد والذوبان	قبل التجمد والذوبان	
0,0	2,65	2,65	1ع
(+) 2,32	2,67	2,61	2ع
(+)0,96	2,11	2,09	3ع

الجدول رقم 29: يبين كثافة العينات قبل وبعد دورات التجمد والذوبان

### VI - 3-1-2 - تأثير دورات التجمد والذوبان على المسامية

لتسليط الضوء على التعديل الذي أصاب شبكة مسامية العينات بدلالة دورات التجمد والذوبان، تم حساب المسامية الكلية بالإعتماد على البرتوكول المذكور في الجزء السابق بعد كل دورتي تجمد وذوبان حتى الدورة 14، النتائج المتحصل عليها ممثلة في الشكل رقم 53.



الشكل رقم 53: يبين تطور المسامية خلال دورات التجمد والذوبان

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

يتبين من خلال هذه النتائج أن العينات عرفت زيادة متباينة في المسامية بعد كل دورة من دورات التجمد والذوبان، فبالنسبة للعيّنة (1ع) كانت في بداية الإختبار تقدر بـ 4,16 %، ثم بدأت بالإرتفاع تدريجياً خاصةً بعد الدّورة الثالثة لتصل لأعلى قيمة لها في الدّورة بـ 12 بـ 4,98 %، في حين العيّنة (2ع) كانت 1,88 %، ثم بدأت بالإرتفاع بعد الدّورة الرّابعة لتصل لأعلى مستوى لها في الدّورة 14 بـ 2,32 %، أما العيّنة (3ع) فكانت 21,07 % لتبدأ بالإزدياد من الدّورة السادسة لتبلغ أعلى مستوى لها في الدّورتين 12 و 14 بـ 29,66 %.

ومن أجل معرفة وتقدير نسب التّغير في المسامية يتم مقارنة القيم مسامية الأوليّة للعينات مع قيم المسامية المتحصّل عليها بعد دورات التّجمد والذّوبان، النتائج مبنية في الجدول رقم 30.

العيّنة	متوسط المسامية قبل التّجمد والذّوبان (%)	متوسط المسامية بعد التّجمد والذّوبان (%)	نسبة التّغير بالزيادة (%)
1ع	4,16	4,98	19,71 (+)
2ع	1,88	2,32	23,40 (+)
3ع	21,07	29,66	40,78 (+)

**الجدول رقم 30:** يبيّن نسبة التّغيرات في المسامية للعينات قبل وبعد دورات التّجمد والذّوبان

من خلال دراسة نتائج هذا الجدول يتضح أن مسامية العينات المدروسة ازدادت بنسب متفاوتة، حيث سجلت أكبر زيادة للمسامية في العيّنة (3ع) (التّوف الكهفي) بنسبة قدرت بـ 40,78 % بعد الدّورة 14، في حين سجلت زيادة طفيفة في كل من العيّنة (1ع) و (2ع) بـ (19,71 و 23,40 %) على التّوالي، كما يتضح أيضاً وجود علاقة بين دورات التّجمد والذّوبان وزيادة المسامية، حيث تزداد المسامية بازدياد الدّورات، وهذه العلاقة صحيحة لجميع أنواع الحجارة المدروسة، وترجع تلك الزيادة إلى إتساع حجم المسامات، و/أو تولّد شقوق دقيقة، و/أو توسّع تلك الموجودة مسبقاً.

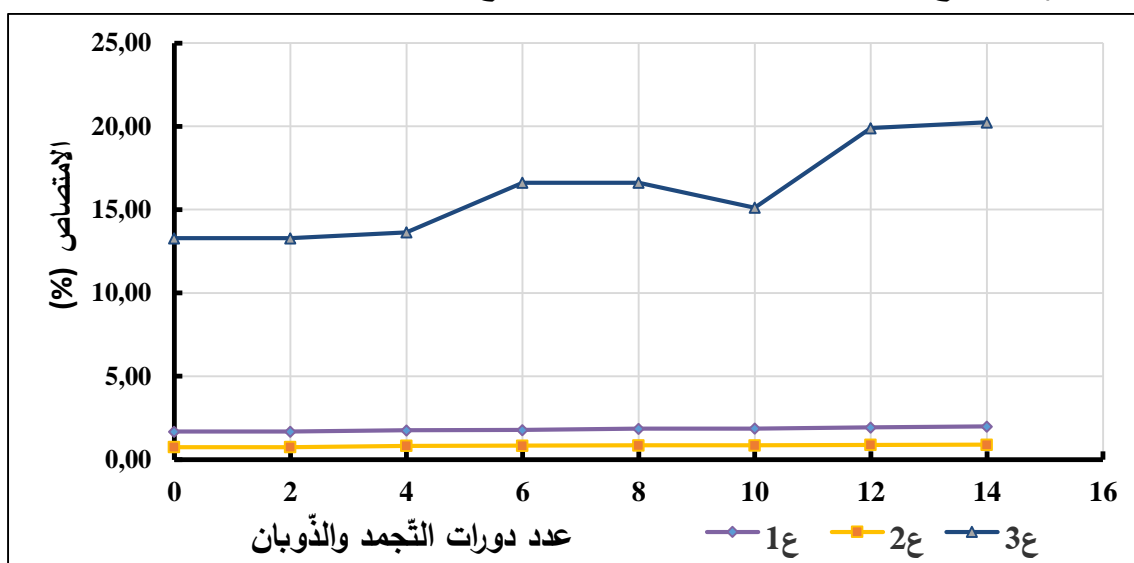
## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

### VI - 4-1-2 - تأثير دورات التجمد والذوبان على خاصية امتصاص الماء

لا شك أنّ عملية اخضاع العينات الحجرية المدروسة لعدد من دورات التجمد والذوبان، يمكن من رصد التطورات التي حدثت لخاصية امتصاصها للماء، وقد تم تمثيل النتائج المتحصل عليها في الشكل (رقم 54)، والذي يتبيّن منه أنّ نسبة الإمتصاص ارتفعت بعد عدد من دورات التجمد والذوبان في كامل العينات، لكن بنسب متفاوتة، فقد سُجّلت زيادة طفيفة في العيّنة (1ع) من (1,68 إلى 1,99%)، أما العيّنة (2ع) من (0,75 إلى 0,89%)، في حين العيّنة (3ع) يلاحظ عدة أطوار، انخفاض في الإمتصاص من الدّورة 2 إلى 4، ليرتفع ابتداءً من الدّورة 4 إلى 6، لتستقر حتى الدّورة 8، ثم تنخفض في الدّورة 9، ليرتفع مرة أخرى لتصل إلى أقصى قيمة لها في الدّورتين 12 و14 بنسبة 20,24%.

أما عند مقارنة قيم الإمتصاص للعينات بعد دورات التجمد والذوبان مع قيم الإمتصاص الأولي كما هو مبين في الجدول رقم 31، يتضح منه أنّ أعلى نسبة امتصاص سُجّلت في العيّنة (3ع) التّوف الكهفي بنسبة تصل إلى 52,41%، تليها العيّنة (2ع) بزيادة تقدر بـ 18,67%، أما في المرتبة الأخيرة تأتي العيّنة (1ع) بزيادة قدرت 18,45%.

ومما سبق نستخلص أنّ دورات التجمد والذوبان أثرت بشكل كبير على خاصية امتصاص الماء للعينات، حيث ارتفعت هذه الخاصية نتيجة زيادة حجم المسام، وتولد الشقوق و/أو إتساع الشقوق الموجودة، وهذا يتوافق مع حالة العينات بعد دورات التجمد.



الشكل رقم 54 منحنى تطور امتصاص الماء للعينات بدلالة دورات التجمد والذوبان

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

نسبة التغير بالزيادة (%)	متوسط نسبة امتصاص الماء (AB (%))		العينة المرجعية
	بعد التجمد والذوبان	قبل التجمد والذوبان	
(+) 18,45	1,99	1,68	1ع
(+) 18,67	0,89	0,75	2ع
(+) 52,41	20,24	13,28	3ع

الجدول رقم 31: نسب تطور امتصاص العينات للماء قبل وبعد دورات التجمد والذوبان

### VI - 2-2 - الخصائص الميكانيكية للعينات بعد دورات التجمد والذوبان

#### VI - 1-2-2 - تأثير دورات التجمد والذوبان على سرعة الموجة فوق الصوتية

يعكس التغير في سرعة انتشار الموجة فوق الصوتية  $V_p$ ، مستوى الضرر الإجمالي للعينات بدلالة دورات التجمد والذوبان، إذ تشير نتائج قياس سرعة الأمواج  $V_p$  للعينات بعد دورات التجمد والذوبان المبينة في الجدول رقم 32 أنّ جميع العينات أظهرت نقصان نسبي مقارنةً بسرعتها الأولية.

بالنسبة للعيّنة (3ع) فقد عرفت أكبر نسبة نقصان للسرعة الموجة  $V_p$  بـ 8,13 % بعد الدورة 14 مقارنة مع العينات الأخرى، تليها العيّنة (2ع) بنسبة نقصان تقدر بـ 3,43 %، وفي الأخير تأتي العيّنة (1ع) حيث سجلت أدنى نقصان قدرت بـ 3,19 %.

نستخلص من هذه النتائج، أنّ الحجارة من صنف العيّنة (1ع) و(2ع) تُعد حجارة صلبة بشكل جيد مقارنة مع العيّنة 3ع التي سجلت أعلى نسبة نقصان لسرعة الموجة فوق الصوتية  $V_p$ ، غير أنّ عدد دورات التجمد والذوبان المطلوبة للوصول إلى هذه القيم يختلف من عينة إلى أخرى وذلك حسب صلابة العيّنة وحالة حفظها، ويرجع هذا الإنخفاض للتدهور الذي أصاب البنية الداخلية للعينات (زيادة في حجم المسامات والفراغات والتجاويف، و/أو تكون شقوق مجهرية، و/أو توسع تلك الموجودة).



## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

نسبة الإنخفاض (%)	متوسط سرعة الموجة Vp (م/ثا)		العينة المرجعية
	بعد التجمد والذوبان	قبل التجمد والذوبان	
(-) 3,19	5241,67	5414,25	1ع
(-) 3,43	5916,00	6125,98	2ع
(-) 8,13	2249,00	2448,00	3ع

الجدول رقم 32: سرعة الموجات فوق الصوتية قبل وبعد دورات التجمد والذوبان

### VI - 2- 2- 2- تأثير دورات التجمد والذوبان على مؤشر الإستمرارية

لقد أتاح لنا قياس سرعة الأمواج Vp للعينات الحجرية بعد إخضاعها لعدد من دورات التجمد والذوبان من تحديد مؤشر الإستمرارية لهذه العينات في نهاية هذه الدورات، والذي بدوره سمح لنا بتقدير مورفولوجية مسام العينات، النتائج مبينة في الجدول رقم 33.

مسامية الشقوق Nf (%)	مسامية المسام Np (%)	المسامية الكلية NT (%)	مؤشر الإستمرارية Ic (%)	العينة المرجعية
0,42	4,56	4,98	83,498	1ع
0,08	2,24	2,32	94,712	2ع
0,83	28,83	29,66	35,595	3ع

الجدول رقم 33: نتائج حساب مؤشر الإستمرارية ومسامية المسام ومسامية الشقوق بعد دورات التجمد والذوبان

تشير نتائج حساب مؤشر الإستمرارية للعينات بعد إخضاعها لدورات التجمد والذوبان المبينة في هذا الجدول إلى انخفاض في مؤشر الإستمرارية، وتباين في المسامية، حيث تم تسجيل نسبة مسامية مسام أكبر من مسامية الشقوق في كل من

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

العيّنات (1ع) و(2ع)، فبالرغم من أنّ الزيادة متوسطة في مسامية المسام وصغيرة في مسامية الشقوق، إلاّ أنّها تُعدّ مؤشر واضحاً على اتّساع المسام، وتشكل شقوق مجهرية، و/أو اتساع تلك الموجودة سابقاً، أما بالنسبة للعيّنة (3ع) فقد سجلت انخفاضاً في مؤشر الإستمرارية بشكل كبير مقارنة مع العيّنات الأخرى، كما رافقه زيادة معتبرة في مسامية المسام، والتي بلغت نسبتها 28,83%، مع انخفاض في مسامية الشقوق إلى 0,83 %، ولتقدير نسبة التّغير في مؤشر الإستمرارية، ومسامية كل من المسام والشقوق، يتم مقارنة النتائج المتحصل عليها بعد دورات التّجمد والذّوبان مع النتائج الأولية ( قبل دورات التّجمد والذّوبان)، النتائج ملخصة في الجدول رقم 34.

العيّنة المرجعية	IC (%)		نسبة التّغير (%)	المسامية الكلية (%)NT		نسبة التّغير (%)	مسامية المسام Np (%)		نسبة التّغير (%)	مسامية الشقوق Nf (%)		نسبة التّغير (%)
	بعد التّجمد	قبل التّجمد		بعد التّجمد	قبل التّجمد		بعد التّجمد	قبل التّجمد		بعد التّجمد	قبل التّجمد	
	بعد التّجمد	قبل التّجمد		بعد التّجمد	قبل التّجمد		بعد التّجمد	قبل التّجمد		بعد التّجمد	قبل التّجمد	
1ع	83,49	90,16	7,39	4,98	4,16	19,71	4,56	4,00	16,47	0,42	0,16	61,90
			(-)			(+)			(+)			(+)
2ع	94,71	98,07	3,426	2,32	1,88	23,40	2,64	1,53	91,90	0,08	0,05	37,50
			(-)			(+)			(+)			(+)
3ع	35,59	38,74	8,13	29,66	21,07	40,78	28,83	19,72	28,96	0,83	1,35	38,52
			(-)			(+)			(+)			(-)

الجدول رقم 34: مقارنة مؤشر الإستمرارية ومختلف أنواع المسامية قبل وبعد دورات التّجمد والذّوبان [(+) بالزيادة، (-) بالنقصان]

يتبين من نتائج هذا الجدول أنّ دورات التّجمد والذّوبان أثرت بشكل كبير على كل من مؤشر الإستمرارية، والمسامية الكلية، ومسامية المسام، ومسامية الشقوق، ويرجع ذلك للتدهور الذي أصاب البنية الدّاخلية للعيّنات، حيث ازدادت مسامية الشقوق بشكل أكبر من مسامية المسام في كل من العيّنات (1ع) و(2ع) بنسبة تقدر بـ (61,90 %، 37,50 %) على التوالي، وبالرغم من أنّ هذه الزيادة ضئيلة إلاّ أنّها مؤشر واضح على توسع الشقوق

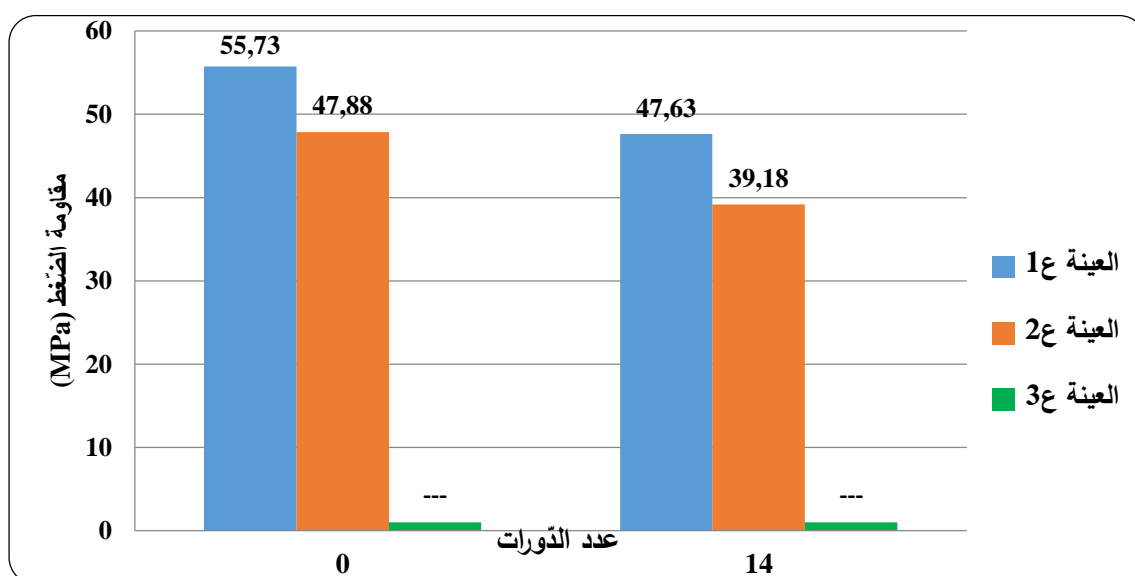
## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

و/أو تولد شقوق جديدة، أما بالنسبة للعيّنة (3ع) فيلاحظ زيادة معتبرة في مسامية المسام بنسبة 28,96 %، وتدني في مسامية الشقوق بنسبة 38,52 %، وهذا يفسر بأنّه قد تم غلق تلك الشقوق الموجودة، نتيجة انفصال الحبيبات المكونة للعيّنة، أما الزيادة في مسامية المسام فترجع إلى اتساع حجم المسام والفجوات بسبب تدهور جدرانها نتيجة انفصال حبيباتها من جراء الضّغط الهيدروليكي والأسموزي المتولد من الجليد.

ومما سبق نستخلص أنّ دورات التّجمد والذّوبان تؤدي إلى زيادة حجم المسام، وغلق الشقوق في العيّنة (3ع)، أما بالنسبة للعيّنات (1ع) و(2ع) فتؤدي إلى اتساع المسام والشقوق الموجودة، و/أو توليد شقوق جديدة.

### VI-2-2-3- تأثير دورات التّجمد والذّوبان على مقاومة الميكانيكة للضغط

يتضح من نتائج اختبار مقاومة الضّغط أحادي المحور للعيّنات بعد إخضاعها لدورات التّجمد والذّوبان أنّ العينات متباينة في مقاومتها للضغوط الواقعة عليها، كما هو مبين في الشكل رقم 55، حيث سجلت أكبر قيمة قبل وبعد دورات التّجمد والذّوبان على مستوى العيّنات (1ع) بمقدار 55,73 MPa، بينما أدنى قيمة لها فقد تم الحصول عليها من العيّنات (2ع) بـ 47,88 MPa، وتجدر الإشارة إلى أنّ العيّنات من نوع (3ع) التّوف الكهفي لم يسجل الجهاز قياس مقاومة الضّغط أي قيمة بالرغم من أنّ العيّنات قد تدمرت.



الشكل رقم 55: نتائج اختبارات مقاومة الضّغط أحادي المحور بعد دورات التّجمد والذّوبان

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

أما بخصوص نسبة خسارة مقاومة الضَّغط للعيّنات، حيث بعد مقارنة قيم النتائج مقاومتها الأولية مع القيم المتحصل عليها بعد دورات التّجمد والذّوبان المبيّنة في الجدول رقم 35، إذ يتبين منها أنّ الحجارة من نوع (1ع) عرفت فقداناً للمقاومة بنسبة قدرت بـ14,52%.

أما الحجارة من نوع (2ع) فقد سجلت أكبر خسارة مقارنة مع العينة (1ع) بـ16,90%، في حين العينة (3ع) فلم تسجل أي قيمة بالرغم من تدمير العيّنات، وذلك نظراً لتدهورها نتيجة دورات التّجمد والذّوبان، كما هو مبين في الجدول رقم 35، والصورة رقم 102.

نسبة فقدان المقاومة (%)	مقاومة الضَّغط Rc (MPa)		القوة (KN)		الكتلة (غ)		العينة المرجعية
	بعد التّجمد	قبل التّجمد	بعد التّجمد	قبل التّجمد	بعد التّجمد	قبل التّجمد	
(-) 14,52	47,63	55,73	75,76	88,63	383,60	385,90	1ع
(-)16,90	39,18	47,88	55,60	75,76	351,50	385,90	2ع
---	---	---	---	---	155,60	168,10	3ع

الجدول رقم 35: نتائج اختبار مقاومة الضَّغط قبل وبعد دورات التّجمد والذّوبان

من خلال ما سبق، نستخلص أنّ دورات التّجمد والذّوبان تؤثر على المقاومة الميكانيكية للحجارة لكن بشكل متفاوت، حيث كلما زاد عدد دورات التّجمد والذّوبان كلما تناقصت المقاومة، غير أنّ هذا التناقص يكون بنسب مختلفة، والذي يعود لزيادة نسبة المسامية، وتشكل الشقوق، وتوسع تلك الموجودة، مما يفقد الحجارة صلابتها وتماسكها.

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

### VI-3- تحليل النتائج

من خلال رصد التكوين المعدني ومختلف الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للعينات قبل وبعد إخضاعها للشيخوخة الإصطناعية عن طريق دورات التجمد والذوبان، يتبين من النتائج المتحصل عليها أنّ العينات تأثرت بدرجات متفاوتة، وذلك حسب تركيبها المعدني أو الفلزي، وطبيعة وجوده خواصها الفيزيائية والميكانيكية.

بالنسبة للعينات (1ع) (الحجارة الكلسية الصلبة) المتكونة من الكالسيت بنسبة 84,30%، ومن الكوارتز بنسبة 15,70%، والتي تمتلك مسامية منخفضة 4,98%، مع كثافة 2,65 غ/سم<sup>3</sup>، فقد شهدت زيادة ضعيفة في المسامية بنسبة تصل إلى 19,71%، وارتفاع في خاصية إمتصاصها للماء بنسبة بلغت 18,45%، وهذا بدوره أثر بشكل كبير على درجة تشبعها، مما عزز الفعل السلبي للجليد، والذي أثر بشكل كبير على جودة خواصها الميكانيكية، إذ فقدت نسبة 3,19% من سرعة الموجة  $V_p$ ، إلى جانب خسارة نسبة 14,52% من مقاومتها للضغط  $R_C$  التي كانت تمتلكها قبل إخضاعها لدورات التجمد والذوبان، وهذا يتوافق مع حالة العينات بعد دورات التجمد والذوبان والتي تظهر تشكل شقوق دقيقة.

أما بالنسبة للعينات الحجرية من نوع البيوكلاست الصلبة (2ع) ذات مسامية تقدر نسبتها بـ 1,88%، وكثافة تقدر بـ 2,61 غ/سم<sup>3</sup>، والمتكونة أساساً من الكالسيت بنسبة 72,70%، مع نسب متوسطة من الكوارتز 27,30%، فقد عرفت زيادة متوسطة في المسامية بنسبة 23,40%، وارتفاعاً في خاصية إمتصاصها للماء بنسبة تقدر بـ 18,67%، وبالمقابل فقد سجلت فقداناً للمقاومة الميكانيكية بنسبة تصل إلى 16,90%، وخسارة نسبة 3,43% من سرعة الموجة فوق الصوتية، وهذا يتوافق مع حالة العينات بعد دورات التجمد والذوبان، والتي تظهر تشكل شقوق دقيقة مع توسع تلك الموجودة مسبقاً، كما تُظهر تشكل فتحات على مستوى العروق، هذه الفتحات والشقوق والتوسع في حجم المسام هي التي أدت إلى الزيادة في المسامية والإمتصاص وفقدان الحجرة لمقاومتها.

في حين الحجرة من صنف العينة (3ع) التوف الكهفي، التي تمتلك مسامية كلية مرتفعة تقدر بـ 21,07%، وكثافة منخفضة بـ 2,09 غ/سم<sup>3</sup>، والمتكونة من الكالسيت



## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

بنسبة 99,40%، ومن الكوارتز بنسبة 0,60%، فقد شهدت تأثيراً كبيراً بدورات التجمد والذوبان، حيث عرفت زيادة كبيرة في المسامية مقارنة مع العينات الأخرى بنسبة تصل إلى 40,78%، إلى جانب ارتفاع في خاصية امتصاصها للماء بنسبة بلغت 52,41% وهذا بدوره أثر بشكل كبير على خاصيتها الميكانيكية، فقد تعرضت لخسارة بنسبة 8,13% من سرعة الموجة فوق الصوتية، وفقدان بنسبة 100% لمقاومتها للضغط، وهذا يتوافق مع مظهر العينات بعد دورات التجمد والذوبان، حيث سجل زيادة في حجم الفتحات والتجاويف، وانقسام بعضها إلى أجزاء، و تفكك وتدمير بعضها الآخر.

وبمقارنة قيم الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للعينات قبل وبعد دورات التجمد والذوبان، النتائج ملخصة في الجدول رقم 36، والتي نستنتج منها وجود علاقة بين الإمتصاص والمسامية، والمقاومة الميكانيكية للضغط مع ازدياد عدد دورات التجمد والذوبان، حيث يلاحظ ازدياداً في قيم الإمتصاص والمسامية لجميع العينات، ويقابله في نفس الوقت انخفاضاً في سرعة الموجة  $V_p$ ، ومقاومة الضّغط  $R_c$  ومؤشر الإستمرارية.

كما تشير هذه النتائج أيضاً إلى أنّ الحجارة من صنف العينة (ع3) تمتلك أعلى نسبة مسامية وامتصاص، والتي تزداد مع دورات التجمد والذوبان، وهذا ما جعلها تمتلك أدنى مقاومة، بينما الحجارة من صنف العينة (ع1) (الحجارة الكلسية) والحجارة من صنف العينة (ع2) (البيوكلاست) فتعد أكثر الحجارة تحملاً ومقاومة للتجمد، إذ لم يسجل وجود علامات على حدوث أضرار بالغة بعد 14 دورة.

في حين تم تسجيل مؤشرات واضحة للتدهور المبكر في حجارة التّوف الكهفي (ع3)، حيث ازداد سمك الفتحات، كما سجل فقدان للوزن مقارنة مع الوزن الأولي عند بداية الدورات وزيادة المسامية والإمتصاص.

وكخلاصة لكل ما سبق يمكن القول أنّه كلما ازدادت المسامية ارتفع معها كل من معامل الإمتصاص والتشعب، وقلت في المقابل المقاومة الميكانيكية وسرعة الموجة فوق الصوتية، ومؤشر الإستمرارية، ومن هذا نستخلص وجود علاقة عكسية بين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية.

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

الخاصية	العينة	القيم قبل دورات التجمد والذوبان	القيم بعد دورات التجمد والذوبان	نسبة التغير (%)
متوسط فقدان الكتلة (غ)	1ع	381,70	374,50	1,89 (-)
	2ع	350,65	349,55	0,31 (-)
	3ع	128,05	120,55	5,86 (-)
متوسط المسامية N(%)	1ع	4,16	4,98	19,71 (+)
	2ع	1,88	2,32	23,40 (+)
	3ع	21,07	29,66	40,78 (+)
متوسط الإمتصاص AB(%)	1ع	1,68	1,99	18,45 (+)
	2ع	0,75	0,89	18,67 (+)
	3ع	13,28	20,24	52,41 (+)
سرعة الموجة Vp (م/ثا)	1ع	5414,25	5241,67	3,19 (-)
	2ع	6612,98	5916,00	3,43 (-)
	3ع	2448,00	2249,00	8,13 (-)
متوسط الكثافة غ/سم <sup>3</sup>	1ع	2,65	2,65	0,00 (-)
	2ع	2,61	2,67	2,46 (+)
	3ع	2,09	2,11	0,83 (+)
متوسط مقاومة الضغط MPa Rc	1ع	55,70	47,60	14,52 (-)
	2ع	47,90	39,20	16,90 (-)
	3ع	---	---	---

الجدول رقم 36: ملخص التغير في الخصائص الفيزيائية والميكانيكية قبل

وبعد دورات التجمد والذوبان [(+) بالزيادة)، (-) بالنقصان)]

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

### الخلاصة

سمحت لنا هذه الدراسة بمقارنة السلوك الهيدروميكانيكي لثلاثة أنواع من الحجارة الكلسية، تمتلك خواص فيزيائية وميكانيكية أولية مختلفة تحت تأثير اختبارات الشخوخة الإصطناعية المسرعة عن طريق دورات التجمد والذوبان في المختبر، والتي تعطي مؤشراً واضحاً على درجة التلف الذي قد يصيب نفس أصناف هذه الحجارة المستخدمة في هياكل مباني الموقع الأثري لجميلة، من جراء آليات التلف الناتجة عن تجمد وذوبان الماء المتواجد في مساماتها فضلاً عن شقوقها وشروخها وتجاويفها.

لقد تم اخضاع عينات من هذه الحجارة الكلسية لعدد من دورات التجمد والذوبان، وفق بروتوكول اختبار يأخذ بعين الإعتبار الظروف المناخية للمنطقة، بالإضافة الى تكييف الشروط التي ينص عليها المعيار الأوربي (NF EN 12371(2010)).

وبما أنّ تلف الحجارة بفعل الجليد يعتمد على درجة تشبعها، لذا اعتمدنا في هذه الدراسة التشبع الطبيعي لمدة 48 ساعة، أما عدد دورات التجمد والذوبان فقد طبقنا 14 دورة، والهدف من ذلك هو معرفة تأثير الجليد على خواص الحجارة، من خلال رصد التطورات أو التغيرات التي تحدث لخواصها الفيزيائية والميكانيكية، حيث يلخص الجدول رقم 37 أهم التطورات التي حدثت للخواص الفيزيائية والميكانيكية للعينات بعد دورات التجمد والذوبان.

يستخلص من نتائج هذا الجدول أنّ عينات الحجارة الثلاثة التي درست قد تضررت جميعها من دورات التجمد والذوبان لكن بدرجات متفاوتة، منها ما يكون على مستوى البنية المجهرية، ومنها ما يكون على المستوى العياني ( ترى بالعين المجردة)، ومع ذلك فإنّ حجم التدهور يختلف حسب نوع الحجارة وصلابتها، فبالرغم من أنّ عدد دورات التجمد والذوبان موحدة لجميع العينات إلا أنّ معدل تدهور الحجارة كان مختلفاً، ولمعرفة درجة الضرر الذي وقع لها فقد تم تقييمه على مستويين:

- الضرر العياني بواسطة الملاحظات البصرية؛

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

- الضّرر في البنية المجهرية من خلال تتبع التّعيرات التي تطرأ على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية، من كثافة العيّات، وفقدان الوزن، والمسامية، وامتصاص الماء، إلى جانب سرعة الموجة  $V_p$ ، ومؤشر الإستمرارية، ومقاومة الضّغط.

بالنسبة للحجارة من صنف (1ع) فهي تعد من الحجارة الأكثر صلابة مقارنة مع العيّات الحجرية الأخرى التي تمت دراستها، إذ تتميز بانخفاض مساميتها، وارتفاع أدائها الميكانيكي في الحالة الأولية ( قبل إخضاعها لدورات التّجمد والذّوبان)، إذ تتحمل هذه التّوعية من الحجارة عددًا من دورات التّجمد والذّوبان (14 دورة) دون حدوث تشقّقات ظاهرة، وعلى الرغم مساميتها ومعامل امتصاصها المنخفض إلاّ أنّه لوحظ انخفاض طفيف في سرعة الموجات  $V_p$  بنسبة 3,19 %، مع فقدان نسبة 14,52 % من مقاومة الضّغط  $R_C$  بعد إخضاعها لدورات التّجمد والذّوبان، فضلاً عن ذلك، فإنّ الملاحظات العيانية تُظهر وجود تشقّقات بسيطة في البنية المجهرية، غير أنّ هذا لم يكن كافياً لإحداث أضرار ظاهرة.

وبالنسبة للحجارة من صنف العيّنة (2ع) (حجارة البيولكلاست) فبناء على خواصها قبل دورات التّجمد والذّوبان فهي ذات مقاومة جيدة ومسامية ضعيفة، وعليه يمكن اعتبار هذه الحجارة صلبة، ومع ذلك فهي أيضاً تتحمل عدد من دورات التّجمد والذّوبان دون حدوث تشقّقات كبيرة، لكن مع ذلك فقد سجلت تغيرات طفيفة في خواصها الميكانيكية، حيث فقدت نسبة 3,43 % من سرعة الموجة فوق الصّوتية، وخسرت نسبة 16,90 % من مقاومة الضّغط  $R_C$ ، في حين سجلت انخفاض طفيف في مساميتها الكلّية، كما تبدي الملاحظات البصرية شقوقاً طفيفة، إلاّ أنّ هذا الضّرر ليس كافياً أيضاً لإحداث ضرراً جسيماً، وعليه يمكن القول أنّ تدهور هذه الحجارة الكلسية ضعيفاً، والضّرر الذي تسببه دورات التّجمد والذّوبان غير منتظم بمرور الوقت.

أما الحجارة من صنف العيّنة (3ع) التّوف الكهفي فتعد أضعف أنواع الحجارة المدروسة وأدناها مقاومةً، حيث تمتلك مسامية مرتفعة تقدر بـ 21,07 %، مع معامل تشبع مرتفع جداً، ومقاومة ميكانيكية منخفضة جداً، وعليه فقد سجلت تدهوراً سريعاً في خواصها الفيزيوميكانيكية بعد 14 دورة تجمد وذوبان، حيث انخفضت سرعة الموجة فوق الصّوتية

## الفصل الخامس: الجانب التطبيقي

بنسبة 8,13 %، وخسرت 100% من مقاومتها للضغط، وزيادة في المسامية بنسبة معتبرة تصل إلى 40,78%، في حين الملاحظات البصرية تظهر تدهورًا كبيرًا لهذه الحجارة، توسع التجاويف والفتحات نتيجة انفصال الحبيبات، وتوسع المسامات وتكوين شقوق دقيقة، واستخلاصا لما سبق يمكن القول أنّ هذه الحجارة غير مقاومة للجليد.

حجارة التّوف	حجارة البيوكلاست	الحجارة الكلسية الصّلبة	العينة المرجعية
3ع	2ع	1ع	نوع الإختبار
انخفاض كبير	انخفاض ضعيف	انخفاض ضعيف	سرعة الموجة Vp
انخفاض كبير	انخفاض ضعيف	انخفاض ضعيف	مؤشر الإستمرارية
انخفاض كبير	انخفاض ضعيف	انخفاض ضعيف	مقاومة الضّغط
زيادة كبيرة	زيادة طفيفة	زيادة طفيفة	الإمتصاص
زيادة كبيرة	زيادة طفيفة	زيادة طفيفة	المسامية الكليّة
زيادة كبيرة	زيادة طفيفة	زيادة طفيفة	مسامية المسام
انخفاض طفيف	زيادة طفيفة	زيادة طفيفة	مسامية الشقوق
انخفاض طفيف	زيادة طفيفة	زيادة طفيفة	التشقّقات

الجدول رقم 37: تطور الخواص الفيزيائية والميكانيكية للحجارة بعد دورات التّجمد والذّوبان

## الإقتراحات

### - الإقتراحات

بناء على نتائج الدّراسة فقد انبثقت منها عدد من التّوصيات والإقتراحات، والتي بتطبيقها تساهم بلا شك في وقاية وحماية الحجارة المشكّلة لهياكل الموقع الأثري من التّأثير الإِتلافي للجليد وغيره من عوامل التّلف، ومن أهم التّوصيات نذكر:

#### 1- تدابير الوقاية والحماية

يجب اتخاذ مجموعة التّدابير والإجراءات التّقنية والوقائية المتعلقة بالوقاية والحماية، فضلاً عن العلاجية، منها ما تتعلق بالآثار نفسها، ومنها ما تخص محيط الموقع الأثري:

##### أ- إجراءات تخص محيط الموقع الأثري

ينبغي القيام بجملة من التّدابير الوقائية على مستوى الفضاء الدّاخلي للموقع الأثري، ومحيطه الخارجى، من أهمها نذكر:

- وضع مخطط عام للموقع الأثري في مدخله، يبين مكونات الموقع الأثري ( الإدارة، المتحف، نقاط الأمن، أماكن الرّاحة والأكل والترفيه، الفضاءات الصّحية)، كما يبين بوضوح مسار الزيارة الذي يفضل أن يربط بين معالمه الهامة، فضلاً عن مراعات خصوصية هذه المعالم إذ يتفادى فيه قدر الإمكان الإضرار بها.

- تجهيز الموقع بلوحات توجيهية وإرشادية وتعليمات للزّوار، وبطاقات شارحة بجانب كل معلم تتضمن معلومات موجزة (التّسمية، لمحة تاريخيه، وأهميته)، إلى جانب تهيئته بمختلف مرافق الرّاحة والأمن والترفيه، من دورات للمياه، وأكشاك للبيع، وأماكن لتقديم العروض، تكون محمية من حرّ الشّمس والتّساقط، ومتناسقة مع الموقع الأثري، وفي نفس الوقت آمنة على الزّوار.

- تهيئة البيئة المحيطة بالموقع الأثري وتحسين مظهرها العام، بتنظيفها وتزيينها، وتجميل مدخله بما يعكس أهميته وجماليته، إلى جانب الحرص على المحافظة على سلامة محيطه الدّاخلي من التّشوه البصري، بالعمل على تنظيف مكوناته من معالم وممرات، وفضاءاته من مختلف الملوثات، وتجهيزه بحاويات لرمي مخلفات الزّوار من الأكل والشّرب، تكون



## الإقتراحات

موزعة على طول مسالك الزيارة وأماكن الراحة بشكل منتظم وواضح ومتاح ومتناسق، فضلاً عن إضافة عناصر جمالية، وتزيين ممراته وساحته بالنباتات والزهور لتصبح مكان جذب للسياح.

- الإهتمام بأمن وسلامة الموقع الأثري، من خلال النّقل من المخاطر سواء الطّبيعية (السيول، والتلوث، التغيرات الجوية)، و/أو البشرية (الحرائق، التخريب والسرقة، تعدي الزوّار،...)، يفضل تركيب أنظمة الحماية المضادة للحرائق تشتغل تلقائياً، وأنظمة للمراقبة والإنذار المضادة للتسلل، من كاميرات وغيرها خاصة في الأماكن المعزولة (الأقبية، الأماكن المعزولة، الطوابق تحت الأرضية)، وغيرها من الأماكن نظراً لشساعت الموقع الأثري، وذلك لضمان حماية ومراقبة الموقع الأثري على مدار 24/24 ساعة، و7/7 أيام في الأسبوع، طوال العام دون استثناء، كما تتم مراقبتها وصيانتها بانتظام، مع ربطها بأقرب مركز للشرطة، والحماية المدنية، والتدخل في الوقت المناسب، فضلاً عن ضمان أمن وسلامة وراحة العاملين والزوّار.

- العمل على مراقبة هياكل المعالم الاثرية بصورة مستمرة من طرف المختصين وتعزيزها وتدعيمها إذا تطلب الأمر ذلك.

- العمل على حماية فورية للمعالم ذات الوّضع الإنشائي السيئ بتدعيمها وتقوية الأجزاء الضعيفة والهشة، وتدعيم الجدران الساندة للمنحدرات لمنع انهيارها، فضلاً عن حماية هذه المعالم من تعدي الزوّار، سواء بالكتابة عليها، أو تسلقها أو الصعود فوقها أو المرور عليها، أو أخذ أجزاء منها كتذكّار (الجدران، الأعمدة، والفسيفساء الأرضية،...)، وذلك بوضع حواجز تحول دون ذلك، قد تكون من الخشب المعالج أو من معادن غير قابلة للصدأ أو أي مادة أخرى، شريطة أن توفر الحماية وتكون آمنة على الآثار والزوّار معاً، ومتناسقة مع المظهر العام للمعلم والموقع الأثري.

- تهيئة الموقع الأثري بالشبكات الصّوروية لتصريف مياه الأمطار، ومنع دخول السيول إليه، بإقامة جدران واقية، أو قنوات الصرف الصحي، وهياكل مماثلة لتحويل مجرى الفيضات والسيول عن محيط الموقع الأثري وربطه بمصب الأودية، بالإضافة إلى حماية

## الإقتراحات

أساسات هياكل المباني الأثرية من تجمع المياه الناتجة عن الأمطار وذوبان الثلوج والجليد، بإنجاز نظام لصرف المياه (Drainage) حول محيطها، ووضع طبقات من الحصى فوق هذا النظام، ليتم صرفها بشكل يحول دون تسربها لداخل الهياكل، ولتجنب الحفر قدر الإمكان في الموقع الأثري يفضل الاستفادة من شبكات تصريف المياه القديمة المتواجدة بالموقع الأثري، بإعادتها للخدمة بالقيام بتنظيفها وإصلاحها، وربطها بنظام صرف المياه الجديد، والذي بدوره يتم ربطه بمجرى بالأودية.

- اعتماد استراتيجية حفظ وقائية تقوم على مبدأ الكشف الإستبقائي عن العيوب والمشاكل ومعالجتها في وقتها دون أي تأخير لضمان سلامة وديمومة مكونات الموقع الأثري، إلى جانب توقع تقدير المخاطر الناجمة من الموقع الأثري وخارجه، من خلال إجراء عملية تقييم بالنظر لطبوغرافية الموقع الأثري، طبيعة المناخ السائد، الطابع الجيولوجي للمنطقة، الزلازل المحلية، الأضرار الناجمة عن القرب من النشاطات البشرية (الصناعية التجارية السكنية، الحرائق التلوث، الطرق،..)، فضلاً عن ذلك تقييم المخاطر التي قد تتجم من هياكل الموقع الأثري، مقاومة الظروف المناخية، لا سيما نقاط الضعف الموجودة في السقوف، في الهياكل، الأجزاء تحت مستوى سطح الأرض، خطر الحرائق، والمخاطر الناجمة عن التمدد البشري (الحرائق، السرقة التخريب، الاضطرابات المدنية،...).

-معالجة غياب الوعي الثقافي بأهمية التراث، بالعمل على نشر الوعي الثقافي المجتمعي بأهمية هذا التراث، وضرورة المحافظة عليه، وكيف يمكن أن يعود عليهم بالفائدة الاقتصادية، عبر تنشيط الحركة السياحية وما يصاحبها من توفير فرص عمل (دائمة أو موسمية)، وزيادة الدخل الفردي، الأمر الذي يشجعهم على الإهتمام والعناية بالموقع الأثري، فضلاً عن تحسين وتطوير البيئة المحيط به (من عمران، وشوارع،...)، ناهيك عن الإنخراط في الأنشطة العلمية والثقافية للتعريف بموروثهم الثقافي والحفاظ عليه.

-الحفاظ على الإنسجام بين الموقع الأثري وبيئته من خلال المحافظة على التوازن البيئي والمناخي وعدم الإخلال به أو إزالته، بالتحكم في الظروف البيئية لمنع أو التقليل من المسببات التي تعزز وتحفز عوامل التلف من إلحاق أي ضرر بمكونات هذا الموقع.

## الإقتراحات

### ب-إجراءات تخص المعالم الأثرية

للوفاية من الجليد ينبغي القيام بتدابير علاجية أي بتدخلات مباشرة على الأثار نفسها وذلك للحد من عملية التدهور، من أهمها نذكر:

#### -علاج العيوب

يجب علاج مختلف العيوب التي تعاني منها حجارة هياكل الموقع الأثري، من شقوق وشروخ، وتصدعات وثقوب، وتجاويف وغيرها، بالقيام بما يلي:

- سدّ الشقوق والشروخ السطحية بملاط مدعم بالراتنجات الصناعية، أما الشقوق العميقة فيستحب ملئها بأسلوب الحقن بملاط يتكون من الرّمل أو مسحوق الحجارة والجير الهوائي مضاف إليه مادة مقوية كالبوزلان، وغراء إكزيليكي من نوع E330، مع نسبة من الماء ليكون أكثر لزوجة لضمان نفاذه إلى أدق الشقوق والشروخ، إلى جانب ذلك، يجب سدّ الفواصل بين الكتل الحجرية بملاط نفوذ يسمح بتدفق الماء بشكل سليم، ويمنع تسربه لداخل الجدران.

-يستحسن تدعيم وتقوية واستبدال الملاط المتدهور، إلى جانب إغلاق وسدّ جميع الفتحات والتشققات الموجودة في الأجزاء العلوية من هياكل المعالم لمنع تجمع وتسرب الماء عبرها.

- العمل على توفير نظام للحماية للهياكل غير المحمية، خاصةً من التغيرات المناخية من درجات الحرارة، وتسرب مياه الأمطار والتلّوج والجليد، بوضع أسقف، أو إنجاز طبقة من الملاط، أو تركيب بلاطات حجرية في قمة الجدران، تكون بسمك معين وبشكل مائل بزواوية لا تقل عن 3%، لضمان التدفق الجيد للماء وعدم تجمعه وتسربه داخل مسامات وشقوق الحجارة، توفر الأمن والسلامة ومتناسقة مع المعالم الأثري والموقع؛

- تدعيم العناصر المهتدة بالسقوط و/أو الانفصال وتثبيت الأجزاء المنفصلة، بتطبيق مواد لاصقة تضمن إعادة التصاقها بشكل جيد، إلى جانب تقوية الحجارة الهشة بمقويات تضمن إعادة تماسك والتحام أجزائها الهشة مع تلك السليمة، وفي نفس الوقت ترفع من المقاومة الميكانيكية للأجزاء المعالجة، كما يجب الأخذ بالإعتبار بأنّ لا تحدث هذه

## الإقتراحات

المواد اللاصقة أو المقوية أي تغيير في خواص الحجارة الفيزيائية و/ أو الميكانيكية، فضلاً عن المظهر العام، ومن المواد المطبقة كمواد لاصقة (LEADN TA1، وLEADN TA2)، أما المقوية (البارالويد B72، و أوروبستاك ACS 2001)، وهيدروكسيد الكالسيوم (ماء الجير)، وهيدروكسيد الباريوم الذي يتفاعل مع (CO<sub>2</sub>) مشكلاً كربونات الباريوم التي تتميز بقدرتها على تثبيت العناصر التي فقدت تماسكها.

- تفكيك وإعادة تركيب الهياكل المهددة بالسقوط أو التي تم إقامتها بطريقة خاطئة أو بها عيوب، كما يفضل استبدال الكتل الحجرية المتدهورة التي تشكل خطراً على استقرار المعالم، بالإضافة إلى تكملة الأجزاء المفقودة مع مراعات أن تكون من نفس صنف الحجارة، وبنفس تقنية البناء، خاصة وأنه يعرف المحاجر التي جلبت منها حجارة هذا الموقع الأثري، وذلك بغرض استرجاع الشكل الأصلي للمعالم قدر الإمكان.

- تدعيم وتقوية التربة الحاملة للمعالم الأثرية بحقنها بمواد مقوية ترفع من كفاءتها وتقوي الترابط بين حبيباتها، أو ملء الفراغات بينها، أو خفض درجة امتصاصها ونفاذيتها ودرجة رطوبتها، أو زيادة قدرتها على التحمل ومقاومة الأحمال أو الهبوط بأنواعه، كالمواد الإسمنتية (ملاط الإسمنت يتكون من الإسمنت + الطين + رمل)، أو الجيرية، أو المحاليل الكيميائية (مثل سيليكات الصوديوم + كلوريد الصوديوم أو سلفات الألومنيوم)، أو الملاط الطيني (طين + ماء + مع بعض الأعشاب)، أو المستحلبات الإسفلتية (مستحلب الإسفلت الخفيف مع ماء مخلوط مع ملاط الإسمنتي) وغيرها من المواد، أو تسليح التربة بالقضبان المعدنية، أو تدعيم أساسات البناء بتغليفها بطبقة من الخرسانة المسلحة المعالجة بمواد تمنع تشكل ودخول الأملاح والملوثات وغيرها من الأضرار.

- معالجة مشكل تجمع مياه الأمطار في الأرضية خاصة عند قوس كركلا بإنجاز نظام يستجمع المياه الأرضية بما يعرف بالأجنبية Traitement avec des colonne ballastés يقوم على حفر قنوات على شكل بثري، قطر من 60 إلى 80 سم، وعمق من 10 إلى 12م، موصولة أفقي بنظام صرف المياه Drainage، الذي يتم ربطه مع مجرى الوادي.

## الإقتراحات

### - عزل الأسطح بمنتجات طاردة للماء

لحفاظ على سلامة الهياكل الأثرية، وضمان مقاومة جيدة لأجزائها خاصةً التي في اتصال مباشر مع البيئة المحيطة بها (تسرب مياه الأمطار، التغيرات في درجات الحرارة، الجليد، الرطوبة) مما يعرضها للأليات تلف مختلفة خاصةً التي ترتبط بعامل الماء، كالأملح والجليد، لذا ينبغي عزل أسطحها بما يعرف بالعزل المائي، وذلك بتطبيق مواد مانعة لتسرب الماء، تعرف بالسوائل العازلة أو الطاردة للماء \* Hydrofugation (1).

والغرض الأساسي من هذه المعالجة الوقائية هو منع تغلغل الماء للمادة، عبر تغيير خواص سطحها، برفع خواص المتانة من خلال التقليل من التلامس بين الماء والمادة للحد الأدنى، من حيث المساحة السطحية والمدة، وبالتالي التقليل من اتصال قطرات الماء، وبهذا يتم الحصول على الخاصية الطاردة للماء (2)، هذه التركيبة الواقية تكون في شكل مستحلب في سائل عضوي أو مائي، تتألف على الأقل من 5% من المادة الفعالة "بوليمرات السيليكون" الذائبة في مذيب "الإيزوبروبيل"، مع كمية صغيرة من محفز، إذ تتغلغل المادة الفعالة في طبقات الحجارة، بينما المذيب يتبخر مؤدياً إلى تشكيل طبقة على سطح الحجارة تكون على شكل شريط عازل يساهم في إطالة عمرها، وبالتالي ديمومة البناء المتشكل منها (3).

ولضمان نجاعة العملية يحبذ أن تتوفر في المادة الطاردة ما يلي:

- أن تكون المادة العازلة آمنة تمامًا على صحة الإنسان، بمعنى غير سامة (سواء المنتج نفسه أو مذيبه)، وغير ضارة على بيئة المبنى والحجارة، كما يجب أخذ احتياطات السلامة والحماية اللازمة باستخدام القفازات، النظارات والقناع، وملابس خاصة، وحذاء، وغيرها (4)؛

\* ظهر مصطلح طارد للماء في عام 1829م، ويقصد به " حفظ الماء والرطوبة"، أما طارد المياه السطحية فهو منتج عديم اللون، وضيافته الأساسية تتمثل في تعديل خواص المعادن السطحية وتزويدها بتأثير طارد اتجاه الماء (تأثير الكارهة للماء) من أجل الحد منه، عن طريق تثبيط التقارب الطبيعي للأسطح المعدنية للمياه، وعمليات الشفط

الشعري، ويتم بعد ذلك تقليل مدة التلامس بين الماء وسطح الحجارة، وبالتالي التقليل من معدل التدهور، أنظر:

Jean Marc Vallet et all, La protection des pierres « de sur les hydrofuges de surface », Association Cercle des partenaires du patrimoine, France, 2000, pp 8-13.

(1) – Jean Marc Vallet et all, La protection des pierres «de sur les hydrofuges de surface », Association Cercle des partenaires du patrimoine,France,2000,p12.

(2) - Claire Moreau, Op cit, p21.

(3)– Ibid ,p21.

(4)– Jean Marc Vallet et all, op.cit, p17.

## الإقتراحات

- اختيار التراكيب التي لها الحد الأقصى من الإختراق في مسام الحجارة (إختراق إلى عمق يصل إلى 35 ملم)، وفي نفس الوقت تتمتع بدرجة عالية من مقاومة نفاذ السوائل، وتدوم لفترة زمنية طويلة، مما يزيد من وظيفة الحماية والتقوية، وبهذا يتم إبطاء أكبر قدر ممكن من عملية تدهور الأسطح المعالجة<sup>(1)</sup>؛

- التأكد من أن المادة المضادة للماء تحافظ على مظهر الحجارة بعد معالجتها، ولا تؤثر على لونها، وعلى نفاذيتها وتداولها للهواء بشكل طبيعي، ولا تعدل من خواصها الفيزيائية والميكانيكية، وفي نفس الوقت تمنع التطور البيولوجي، فضلاً عن تقوية مقاومة الأسطح المعالجة ضد الرطوبة والتساقط بتعزيز مقاومتها للتأثيرات الضارة للأحماض الموجودة في مياه الأمطار، كما يجب أن تتمتع بمقاومة للأشعة فوق البنفسجية، ودرجات الحرارة المرتفعة، وتمنع تآكل الأسطح<sup>(2)</sup>، كما تقلل من امتصاص الغازات الملوثة كثاني أكسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين، فضلاً عن منعها هجرة وإثراء الأملاح الذائبة، والتقليل من كمية وتثبيت الجزيئات والجسيمات لمنع تكون القشور<sup>(3)</sup>.

أما بخصوص طريقة تطبيقها فيفضل مراعات ما يلي<sup>(4)</sup>:

- معالجة أولاً مشكلة تسرب الماء بالقيام بإصلاح مختلف العيوب (سد الفراغات والشقوق والشروخ، التجايف، الثقوب،...)، التي تعد الأماكن المفضلة لتسرب وتجمع الماء؛

- تنظيف سطح الحجارة جيداً من مختلف الملوثات والقشور، ثم يتم تطبيق المادة الطاردة للماء على عدة طبقات ( قد يكون بمسدس الرش، أو بالأسطوانة أو الفرشاة)، ويجب أن يكون بشكل موحد دون وجود فواصل زمنية كبيرة، مع تقادي انسيابها على باقي المناطق، أما إذا كان السطح كبيراً، فيفضل تقسيمه لأجزاء وتنفيذ العمل بالتناوب، كما يجب توفير الكمية اللازم تطبيقها للحصول على إختراق جيد للمادة، فضلاً عن معرفة الوقت اللازم للمنتج لتحقيق الكفاءة بنسبة 100% بعد تطبيقه؛

(1) -<https://ar.decorexpro.com/gidroizolyaciya/gidrofobizator/>, [consulté le 15 septembre 2018].

(2) - Idem

(3) - Claire Moreau, Op cit, pp22-23.

(4) - Jean Marc Vallet et all , op.cit, p17



## الإقتراحات

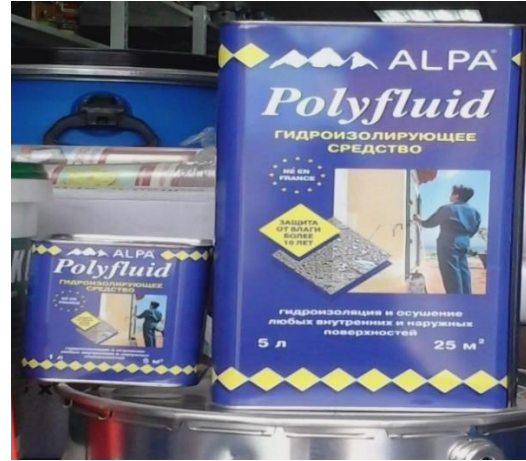
- مراعات درجة حرارة الجو عند تنفيذ العملية، إذ يجب أن تكون في نطاق يتراوح بين (-20م° إلى +30م°)، إلا أنه يفضل أن يتم العمل في الهواء الطلق عند درجة حرارة تقدر بـ +10م°، مع مراعاة الحد الأدنى من الرطوبة، وغياب الرياح القوية، ولضمان نجاعة العملية يجب حماية السطح المعالج من الإتصال بالماء خلال فترة أو مرحلة اكتساب المادة لخصائص الحماية والمقدرة بـ 24 ساعة على الأقل.

ويمكن إجمال أهم المنتجات المستخدمة، في المركبات القائمة على السيليكون، (Polysiloxanes، Silanes، Polymers، Oligomers، Alkylalkoxy polysiloxane، Polymiloxane polysiloxane)، وراتنجات السيليكون، والشّموع الغريزوفولفين ومشتقاتها، وراتنجات الإكريليكية، و®Téflon (Le polytétra fluoroé thylène PTFE)، والراتنجات المفلورة العضوية، وراتنجات البولي يوريثان، ومن أبرز العلامات التجارية للمواد العازلة للماء والمضادة للتجمد (Alpa polyfluid®) المبين في الصورة رقم 107، والتي تتميز بقدرتها على التغلغل عميقاً في مسام الحجارة، وبذلك تمنع تسرب الماء لداخلها كما هو موضح في الصورة رقم 108، ناهيك على فعاليتها في معالجة العيوب الموجودة في الحجارة، ومن سلبياتها تكلفتها المرتفعة، وتطلبها يد عاملة مؤهلة.



ب

الصورة رقم 108: تبين سطح حجارة قبل وبعد المعالجة بالمادة الطاردة للماء (أ: قبل العلاج، ب: بعد العلاج) (2)



الصورة رقم 107: تبين المادة الطاردة للماء من نوع Alpa polyfluid® (1)

(1)-Idem.

(2)-Idem.

## الإقتراحات

### 2-تدابير التنبؤ والإنذار بحدوث الجليد

تُعد عملية مراقبة الجليد والتنبؤ بحدوثه قبل فترة زمنية من أهم الأعمال الوقائية من خطر الجليد، كونها تمنح الوقت الكافي لأخذ الاحتياطات اللازمة، ناهيك عن تقديمها معلومات الهامة عن شدة ومدة الجليد، فضلاً عن مساعدتها في اختيار أفضل المواد وأنجع الأساليب الوقائية والعلاجية، وفيما يلي نقدم بعضاً من أهم هذه التدابير (1):

#### أ-تجهيز الموقع بأجهزة لمراقبة التغيرات في درجات الحرارة

لوقاية الموقع من خطر الجليد يفضل تزويده بأجهزة لمراقبة التغيرات في درجات الحرارة، قد تكون تقليدية (مقاييس للحرارة)، أو أتوماتيكية، إلا أنه يُستحب تركيب أجهزة تعمل بصورة أتوماتيكية لمراقبة التغيرات في درجات الحرارة في الجو وعلى سطح الحجارة وداخلها، كالجهاز الذي يطلق عليه المحطة المناخية المصغرة (Mini station VAISALA)، الذي يحتوي على مستشعرات حساسة جداً لدرجات الحرارة، بحيث تسمح بتقدير درجة حرارة في الجو، وفي داخل جسم الحجارة، كما هو مبين في الصورة رقم 109.



الصورة رقم 109: تبين تركيب محطة مناخية مصغرة على جدار من الحجارة

أ: محطة مناخية مصغرة من نوع VAISALA

ب: منظر خارجي لتركيب الجهاز.

ج: منظر لتركيب مستشعرات الحرارة داخل الحجارة (2).

(1)-على عباس، المرجع السابق، ص ص11-12.

(2)- Rana, Azzedine, Op.cit ,p45

## الإقتراحات

### ب-تجهيز الموقع بأجهزة الكشف والإنذار بقروب الجليد

يفضل تركيب أنظمة تكشف وتنذر بقروب وقوع الجليد تعمل بشكل أوتوماتيكي، تعرف بأجهزة إنذار مضادة للجليد (Alarme Antigel)، والتي تُعد من الأساليب الرئيسيّة المعتمدة للوقاية من خطر الجليد في مختلف المجالات (الفلاحية، الصّناعية، والهندسة المدنية)، وهي عبارة عن أجهزة تحوي على مجسات استشعار حساسة جداً لدرجات الحرارة، ومنبه، فضلاً على ذلك، فهي مزودة بنظام رقمي يمكنه بعث رسائل نصية تحذيرية لثلاثة هواتف محمولة، تتضمن مختلف البيانات عن درجات الحرارة (الرطوبة والجافة)، الرطوبة، سرعة الرياح، الندى، الجليد، وقد تعددت الأجهزة المستخدمة في الكشف والإنذار، منها ما يتم تثبيتها على حوامل (أعمدة) ثابتة كما يظهر في الصورة رقم 110، ومنها ما تكون غير ثابتة متنقلة يمكن وضعها في أي مكان بالموقع، ومن المستحسن أن يتم وضع هذه الأجهزة في أخفض منطقة بالموقع، حتى يتم معرفة أولى لحظات تشكّل الجليد.



الصورة رقم 110: تبين جهاز إنذار الجليد من نوع THERMOKI-106-GSM<sup>(1)</sup>.

### ج-تجهيز الموقع بوسائل للوقاية أو الحماية من الجليد

لحماية الآثار من خطر الجليد وتحقيق مبدأ السلامة والأمان بأقل تكلفة، يفضل تركيب أنظمة للوقاية من الجليد تعمل بصفة آلية، منها ما تقوم على تسخين الأسطح، ومنها ما

(1) -<http://www.climakiwi-france.fr/index1.html>, [consulté le 20 janvier 2019].

## الإقتراحات

تقوم على تسخين الهواء المحيط بالمعالم وذلك بهدف الحفاظ على استقرار درجة حرارتها فوق نقطة التجمّد (رفع درجة، وحرارة الهواء البارد)، ومنها ما تقوم بتحريك وطرده الهواء البارد من المنطقة بآلات خاصة، ومن بين هذه الأنظمة نذكر:

### - النظام القائم على توليد الرياح

يمكن مكافحة الجليد باستخدام أجهزة تعمل على توليد الرياح، تعرف بآلات أو مراوح الرياح، ويطلق عليها أحياناً "الأبراج المضادة للجليد"، حيث تقوم بمزج الهواء البارد في الطبقات القريبة من سطح الأرض مع الهواء الدافئ نسبياً في الطبقات التي تعلوها، ومنها ما تعمل على طرد الهواء البارد خارج المنطقة المحمية (1).

تتكون هذه الآلات من مراوح ذات قطر يتراوح من (2,50 إلى 4 م)، تدور حول محورها بسرعة تبلغ حوالي 900 إلى 1300 دورة في ساعة، تشتغل بالطاقة الكهربائية، كما يمكن أن تعمل بمحرك كهربائي، ويمكن ربطها بجهاز للتدفئة لتحسين الحماية.

فضلاً عن ذلك، توجد أنواع متعددة من هذه الآلات، منها ما تكون مركبة في أبراج ثابتة بعلو يتراوح من 10 إلى 11 متر (الشكل رقم 56)، والتي من إيجابياتها أنها ذات فعالية عالية، حيث يمكنها تغطية مساحة كبيرة، ناهيك عن أنها لا تتطلب يد عاملة كبيرة، أما من سلبياتها، توليد ضوضاء وازعاج كبير، فضلاً عن استهلاك الطاقة بشكل كبير.

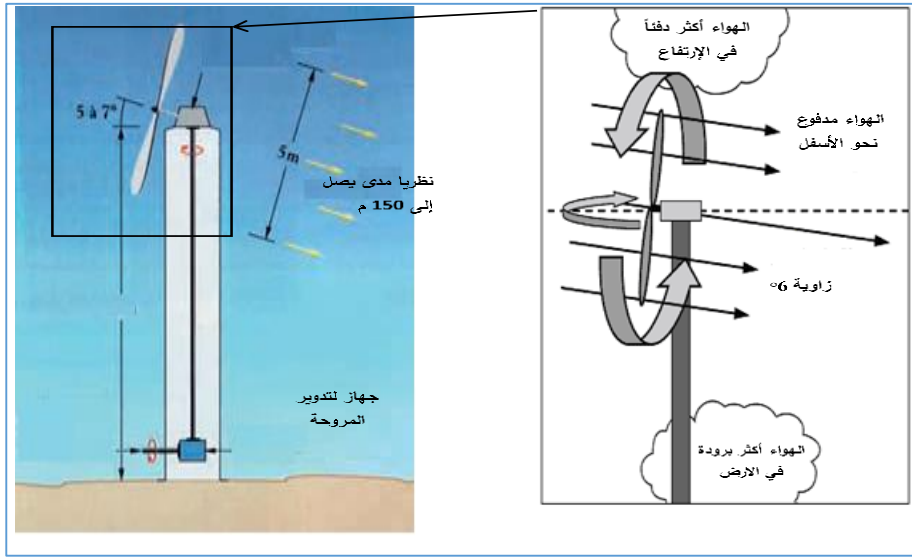
ومنها ما تكون عبارة عن أبراج متنقلة تقوم على عجلات (الصورة رقم 111)، تعمل بنفس مبدأ الأبراج الثابتة، إلا أنها تتميز عنها بإمكانية نقلها وتركيبها وفق الاحتياج، ناهيك عن أنها ذات تشغيل وإغلاق أوتوماتيكي، كما تتميز بضجيج أقل، فضلاً على أنها تستخدم بشكل كبير في المناطق ذات القيمة التراثية الكبيرة (2).

أما من سلبياتها، فهي توفر مساحة حماية أقل من ثلاثة هكتارات، واستهلاك كبير للطاقة، وتكلفتها المرتفعة، بالإضافة إلى تأثيرها السلبي على المظهر العام للموقع الأثري.

(1) - على عباس، مرجع سابق، ص 22.

(2) - Joël Rochard, Op.ct.pp22,23.

## الإقتراحات



الشكل رقم 56: يبين برج ثابت مضاد للجليد (1)



الصورة رقم 111: برج متنقل مضاد للجليد (2)

### -النظام القائم على استخراج الهواء البارد

يمكن استخدام أجهزة تقوم باستخراج الهواء البارد (Extraction de l'air froid) المتراكم، وطرده بشكل انتقائي وتلقائي خارج المنطقة المراد حمايتها، هذه الأجهزة عبارة عن آلات للرياح تحتوي على مراوح كبيرة أفقية (الصورة رقم 112)، ومنها ما يكون مزود

(1) -Ibid. p 22.

(2) -<http://www.agrofrost.eu/fr/windmachine>. ,[consulté le 20 janvier 2019].

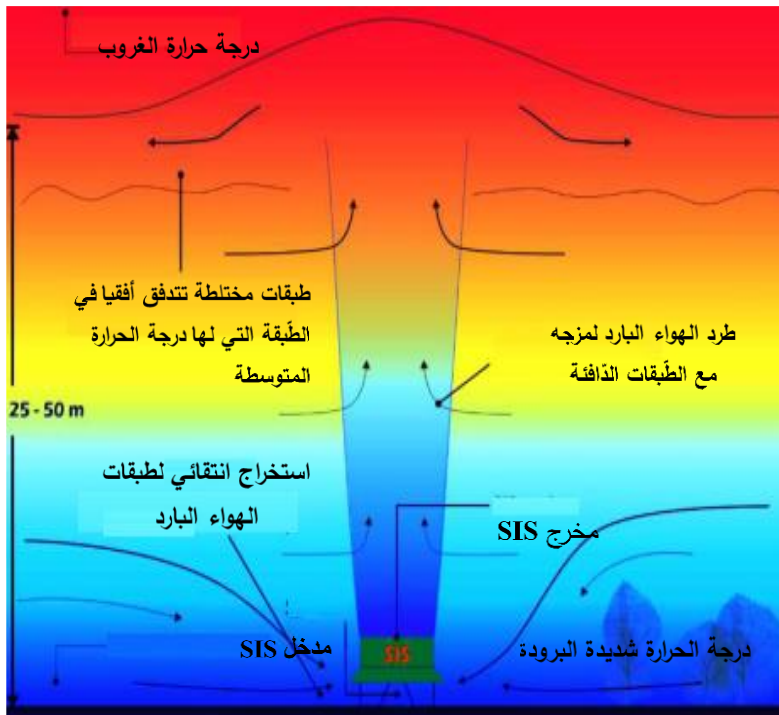


## الإقتراحات

بنظام للتدفئة (سخانات) تقوم بإضافة الحرارة إلى المنطقة المغمورة بالهواء البارد مثل نظام Selective Inverted Sinks (SIS)، (الشكل رقم 57).



الصورة رقم 112: تبين جهاز استخراج الهواء البارد (1)



الشكل رقم 57: تمثيل بياني لعمل نظام SIS في الغلاف الجوي الطبقي (2).

- (1) - Joël Rochard et all, Itinéraires N° 27, La Grêle et le gel de printemps: Comment s'en Protéger, L'institut Français de la vigne et du vin, France, 2018, p 24.  
(2) - www.frostprotection.com. ,[consulté le 20 janvier 2019].



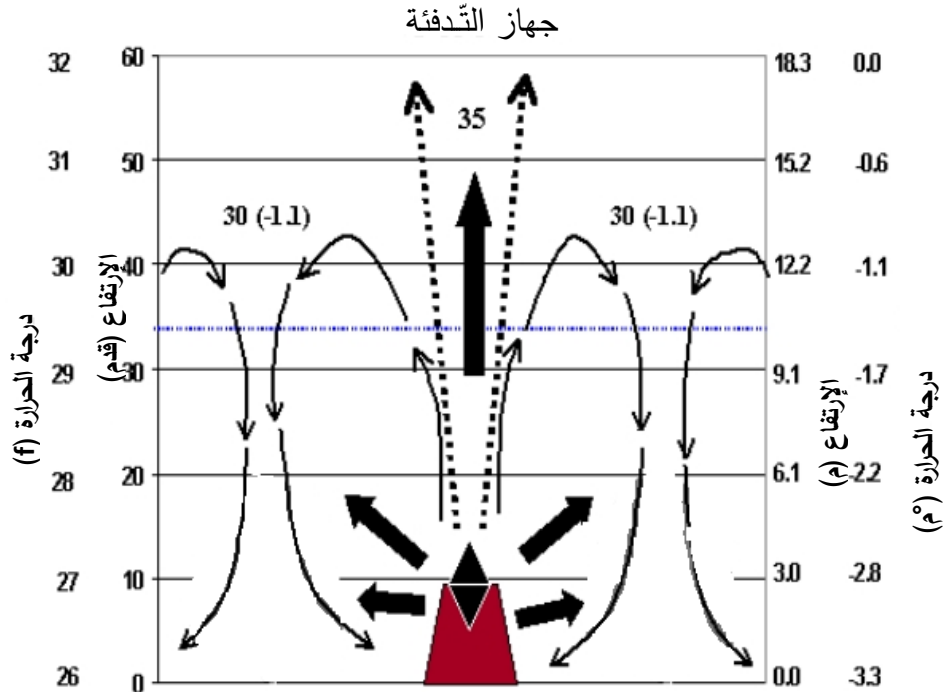
## الإقتراحات

### - النظام القائم على التسخين

تعد هذه الطريقة فعالة للوقاية من خطر الجليد، فهي تتم إما عن طريق تسخين الهواء المحيط بالآثار، أو التسخين المباشر للأسطح:

#### \* تسخين الهواء

تقوم هذه الطريقة على تدفئة الهواء مباشرة، بأجهزة تقذف الهواء الساخن لمزجه مع الهواء البارد<sup>(1)</sup>، كما هو مبين في الشكل رقم 58، وبذلك يتم رفع درجة حرارة الهواء فوق نقطة التجمد، فضلاً عن ذلك، يجب أن تكون هذه الأجهزة آمنة على الآثار والإنسان معاً، حيث لا تبعث غازات ملوثة، أي التقليل من غاز الكربون عن طريق إنتاج سرعات حرارية من احتراق الهيدروجين (تكوين الماء، دون انبعاث CO<sub>2</sub>)، ويفضل استخدام أجهزة صغيرة الحجم توضع بالقرب المعالم على بعد مدروس، تتركب في بداية الموسم وتزال بعد نهاية خطر الجليد، وتشغل هذه الأجهزة بالوقود أو بالغاز أو بالكهرباء، ويمكن استخدام أجهزة تشغل بالطاقة الشمسية، لكن من سلبياتها تكلفتها المرتفعة.



الشكل رقم 58: يظهر تأثير طاقة التدفئة على درجة حرارة طبقات الغلاف الجوي<sup>(2)</sup>

(1) - Richard L. Snyder, Principles of Frost Protection, 2001 (<http://biomet.ucdavis.edu/frostprotection/Principles%20of%20Frost%20Protection/FP005.html>), [consulté le 20 janvier 2019].

(2) - Ibi

## الإقتراحات

### \*تسخين الأسطح

تعد عملية تدفئة أو تسخين الأسطح والأسقف وسيلة فعالة للوقاية من الأضرار التي تلحق بالمباني بفعل الجليد، فضلاً على أنها توفر مستوى عالٍ من الأمان، وتقلل من التكاليف (1)، ويتم ذلك من خلال تركيب نظام لمكافحة الجليد يقوم على استخدام كوابل للتدفئة (Câble chauffant) تشتغل بالكهرباء، تعمل على تدفئة الأسطح المثبتة عليها عند درجات حرارة تتراوح بين (+5° إلى -15°م)، يعمل بشكل أوتوماتيكي، وبذلك تمنع تراكم الثلوج وتشكل الجليد على الأسطح (2).

يستخدم هذا النظام بشكل كبير على مستوى أسقف المباني، والمزاريب، وحتى قنوات صرف مياه الأمطار (الصورة رقم 113)، وسلام الدرج، الطرق المعبدة، وغيرها من الأماكن المعرضة للجليد، خاصة في البلدان التي تعرف تساقطاً كثيفاً للثلوج وتشكل الجليد، كروسيا، الولايات المتحدة الأمريكية، وغيرها من البلدان.



الصورة رقم 113: تبين ذوبان الثلج والجليد على سقف نتيجة تثبيت كابل التسخين (3).

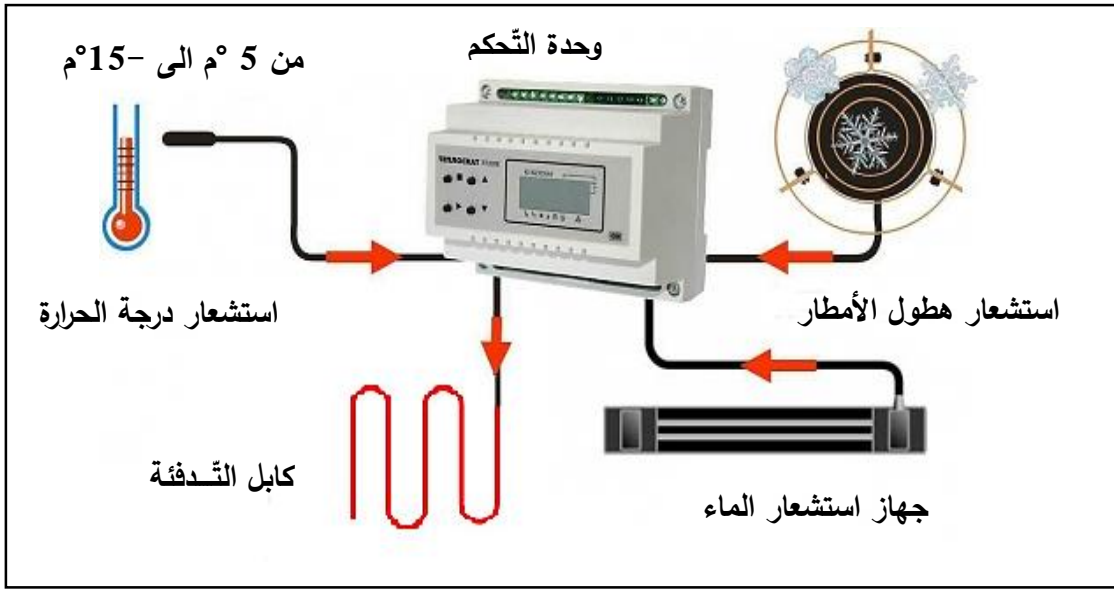
(1) - <https://eltherm.com/fr/applications/solutions-personnalisees/chauffage-antenne-et-de-miroir-parabolique/>, [consulté le 20 janvier 2019].

(2)-<https://patter.ru/ar/insulation-and-insulation/roof-heating-system-roof-with-electric-heating-photos-and-video-all-about-modern-systems-of-electric-heating-of-a-roof-a-roof-and-watercourses/>, [consulté le 20 janvier 2019].

(3) -<https://ar.decorexpro.com/krysha/obogrev/>, [consulté le 20 janvier 2019].

## الإقتراحات

يتكون نظام التدفئة بالكوابل من عدد من العناصر، (مستشعرات للحرارة، كابلات التدفئة، وحدة التحكم)، إلى جانب شبكة توزيع تؤمن الإتصال بين جميع عناصر النظام، وتوفر الطاقة الكهربائية للكابلات، كما هو موضح في الشكل (رقم 59)، حيث تتحكم وحدة التحكم في جميع المستشعرات، وفي تشغيل كوابل التدفئة وإغلاقها أوتوماتيكياً في حالة الطوارئ، أما المستشعرات فتعمل على تحديد تساقط الأمطار، ودرجة حرارة السطح والهواء، والتي على أساسها يتم تشغيل أو إيقاف النظام بشكل آلي، أما كوابل التسخين فتثبت على الأسطح المراد حمايتها من الجليد بشكل متعرج (Forme de serpentin)، وهي تتكون من عناصر تقوم بتحويل الطاقة الكهربائية إلى حرارة ينتج عنها ذوبان الثلج والجليد (1).



الشكل رقم 59: يبين نظام مكافحة التجمد (2)

أما بالنسبة لكوابل أنظمة التسخين فتوجد منها عدة أنواع من بينها (3):

-كابل مقاوم: عبارة عن نواة معدنية مغطاة بطبقة عازلة، ترتفع درجة حرارة هذا الكابل بالتساوي لدرجة محددة عند تدفق التيار الكهربائي خلاله، إذ يتم تثبيت مستوى التسخين

(1) - <https://ar.decorexpro.com/krysha/obogrev/>, Op.cit.

(2)-<http://strport.ru/stroitelstvo-domov/obogrev-vodostokov-i-krovli-sistemy-antiobledeneniya-svoimi-rukami>,[consulté le 20 janvier 2019].

(3) -<https://patter.ru/ar/insulation-and-insulation/roof-heating-system-roof-with-electric-heating-photos-and-video-all-about-modern-systems-of-electric-heating-of-a-roof-a-roof-and-watercourses/>,[consulté le 20 janvier 2019]

## الإقتراحات

من خلال أجهزة استشعار متصلة بمنظم الحرارة (ترموستات)، ومن مميزاتة، أنه سهل التركيب وأقل كلفةً، لكن من سلبياته أنه يتعرض للتلف بسرعة بسبب اختلاف درجة حرارة التعرض، مما يتطلب استبداله، كما أنه يصنع بأطوال ثابتة في حالة القص منه تضعف كفاءته؛

- **كابل ذاتي التنظيم:** يتميز بقدرته على تغيير مقاومته اعتمادًا على درجة الحرارة المحيطة به، بمعنى أنه يعدل درجة حرارة التسخين حسب درجة حرارة الجو بشكل تلقائي، فالأسطح الموجودة في الظل يتم تسخينها بشكل مكثف أكبر من تلك الموجودة في المناطق التي تتعرض للشمس بشكل كبير، وكلما كانت البيئة أكثر برودة حول الكابل كلما زادت الطاقة الحرارية التي يحزرها هذا الكابل والعكس صحيح، فعل سبيل المثال يوجد كابل تدفئة Elektra Selftec® Pro، يعتمد على نظام ذاتي التنظيم Self-régulation، هو كابل عريض ذو سلك ناقل مزدوج، لا يحتاج للوصل بالكهرباء إلا من جهة واحدة، ومن مميزاتة ما يلي<sup>(1)</sup>:

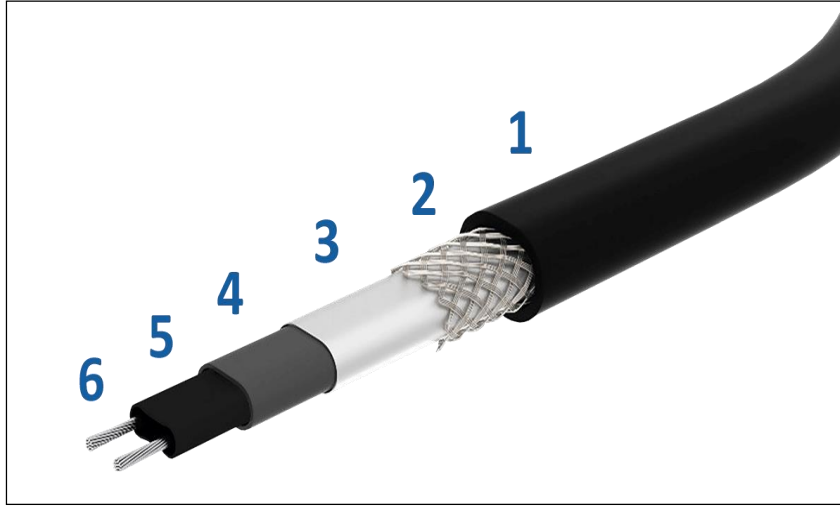
- أقصى درجة حرارة تشغيل تصل إلى +65 °م،
- أقصى تحمل لدرجة الحرارة تصل إلى +85°م؛
- طاقة التسخين تبلغ (10 أو 20 أو 33) واط /م؛
- الطاقة الكهربائية المستخدمة: 230 فولت ~ 60/50 هرتز؛
- الحجم الخارجي للكابل يتراوح من 7 × 11 ملم، يعطي طاقة تسخين (10، 20 واط/م)، أما الذي يبلغ ~ 7 × 13 ملم فيعطي (33 واط/م)؛
- أدنى درجة حرارة للتركيب تصل إلى (-30°م) .

زيادة على ذلك، فالكابل يتكون من غلاف خارجي مقاوم للنار، وللأشعة فوق

البنفسجية، بالإضافة إلى أربعة طبقات للحماية كما يظهر في الصورة رقم 114.

(1) - <https://www.samm.com/ar/product/1137/%d9%83%d8%a8%d9%84-%d8%aa%d8%b3%d8%ae% d9%8a% d9%86-elektra-%d9%85%d9%88%d8%af%d9%8a%d9%84-selftec-pro.html> , [consulté le 20 janvier 2019].

## الإقتراحات



الصورة رقم 114: مكونات كابل التسخين

(1-الطبقة الخارجية من PVC مقاومة للحرارة والأشعة فوق البنفسجية، 2: طبقة تقوية من النحاس المضفور، 3 طبقة حماية من رقائق الألمنيوم، 4: طبقة عازلة من بولييفين، 5 : طبقة نصف ناقلة ذاتية التنظيم، 6: أسلاك التدفئة من النحاس ناقلة للكهرباء)<sup>(1)</sup>.

ولتحقيق الحد الأقصى من توفير الطاقة، نوصي باستخدام أنظمة التحكم المتطورة مثبتة بالموقع، يمكن ربطها بالعديد من محطات الطقس أو عدة أجهزة استشعار مثبتة على الأعمدة، مع الأخذ بعين الاعتبار درجات الحرارة، وسرعة الرياح والتساقط في إعداد نظام التدفئة، ومن مزايا هذا النظام مقاومة كبيرة للطقس حتى في أكثر المناطق تطرفاً، فضلاً عن توزيع حراري فعال ومتجانس على كامل السطح، ومقاومة جيدة للرطوبة، وديمومة طويلة، وحمولة الحد الأدنى من الوزن (لا يشكل ثقل إضافي على هيكل البناء)، كما أنه آمن للاستخدام في الأماكن المغلقة والهواء الطلق، كما يمكن أن يعمل بالطاقة الشمسية، لكن من سلبياته تكلفته المرتفعة، وتطلبه يد عاملة مؤهلة لصيانته.

(1) – Ibid.

الخاتمة

---

الخاتمة



## الخاتمة

### الخاتمة

لقد سمح لنا هذا البحث بإلقاء الضوء على أحد الكنوز التي تزخر بها الجزائر وهو الموقع الأثري لجميلة، وعلى حالة حفظه ومظاهر تلف الحجارة الكلسية المكونة لهياكل بناياته والعوامل المتسببة في ذلك، فضلاً على التركيز أحد هذه العوامل التي تشكل تهديد على سلامة وديمومة معالمه ألا وهو الجليد.

لقد بين لنا التشخيص بالعين المجردة لمظاهر تلف حجارة الموقع الأثري لجميلة وجود ثلاثة أنواع من الحجارة الكلسية متفاوتة في درجة التلف، ويرجع ذلك لطبيعة تكوينها الفلزي وموادها الرابطة، فضلاً عن خواصها الفيزيوميكانيكية، والتي أثرت بشكل أو بآخر على درجة مقاومتها لعوامل التلف المختلفة خاصة العوامل المناخية، والتي تعمل بشكل منفرد أو مشترك في إحكام دائرة التلف، التي أوصلت حالة حفظ المعالم المتشكلة منها للوضعية التي هي عليها الآن.

وبما أنّ منطقة جميلة تقع ضمن إقليم الهضاب العليا، حيث يسوده مناخ شبه قاري، حار وجاف صيفاً، ممطر وبارد شتاءً، حيث تنخفض خلاله درجة الحرارة إلى ما دون الصفر درجة مئوية، الأمر الذي يعرض الموقع لتشكّل الجليد، خاصةً في فصل الشتاء والرّبيع، والذي قد يكون بشكل يومي أو موسمي، وعليه فحجارة الموقع الأثري تتعرض بشكل كبير لآليات التلف المصاحبة لتشكّل الجليد وذوبانه، والتي تسهم بصورة أو بأخرى في إضعاف صلابتها وناهيك عن مقاومتها نتيجة تراكم الأضرار بسبب تكرار تعرضها لدورات الجليد، مما يؤثر على ديمومتها وبالتالي على ديمومة الآثار المتشكلة منها.

ولدراسة هذه التأثيرات مخبرياً، حاولنا استنساخ نفس الظروف في المختبر، من خلال شيخوخة اصطناعية عن طريق اختبارات التجمّد والذوبان المسرعة على عينات من حجارة الموقع الأثري لجميلة، بغرض معرفة وتقدير التغيرات التي تحدث لخواصها الفيزيائية والميكانيكية، ولكن نظراً لحصولنا على ترخيص محدود الإستعمال من طرف الهيئة المسؤولة (الديوان الوطني لتسيير واستغلال الممتلكات الثقافية المحمية (OGBEC)، لا يسمح لنا بأخذ عينات من الموقع الأثري، لذا لجأنا لأخذ عينات من صنف هذه الحجارة لكن من المحاجر

## الخاتمة

التي جلبت منها ، وذلك بالاعتماد على الدراسة التي أنجزت تحت إشراف المفوضية الأوروبية في إطار مشروع Medistone.

المحجر الأول يوجد في جبل جميلة على بعد 1 كم جنوب الموقع الأثري، أخذنا منه العينة (1ع)، التي هي عبارة عن حجارة كلسية صلبة ذات لون رمادي وحبيبات ناعمة.

أما المحجر الثاني فيقع في جبل سيدي سعدون، أخذنا منه العينة (2ع)، والتي هي عبارة عن حجارة جيرية من نوع البيوكلاست الرمادي ذات الحبيبات الناعمة.

في حين المحجر الثالث يقع غرب الموقع الأثري في الصفة الجنوبية لواد الزتين بالقرب من منبع مائي حار مستغل حالياً كحمام معدني طبيعي يعرف بحمام الدهامشة، جلبنا منه العينة (3ع)، التي هي عبارة عن حجارة كلسية من نوع التوف الكهفي.

بعد القيام بالتحاليل الكيميائية والمعدنية، وتعيين الخواص الفيزيائية والميكانيكية للعينات، توصلنا إلى أنّ الحجارة الكلسية من نوع التوف الكهفي (3ع) التي تمتلك كتلة حجمية 1,65 غ/سم<sup>3</sup>، وكثافة 2,09 غ/سم<sup>3</sup>، ومسامية مرتفعة 21,07%، تُعد حجارة ضعيفة جداً، لا تقاوم عوامل التلف المختلفة، نتيجة ضعف بنيتها الداخلية، والتي تحفز العديد من عمليات التلف المرتبطة بتآكل وذوبان مكوناتها الفلزية الضعيفة (الكالسيوم)، لذا هي في حالة تناقص مستمر، وبذلك فهي مهددة بالزوال والاندثار خاصة إذا لم تُتخذ الاحتياطات والتدابير اللازمة لحمايتها ووقايتها.

في حين النوعين الآخرين من الحجارة (1ع) و(2ع)، يمتلكان كثافة جيدة تقدر بـ 2,65 و 2,61 غ/سم<sup>3</sup>، وكتلة حجمية 2,65 و 2,55 غ/سم<sup>3</sup> على التوالي، إذ يتميزان بمقاومة وصلابة جيدة نوعاً ما، وبالرغم من هذه الصفات الجيدة إلا أنه يلاحظ أنهما قد تعرضتا لبعض الانحلال لكن بدرجة أقل من العينة (3ع)، والعديد من مظاهر التقشر والتشريح والتشق والتصدع.

## الخاتمة

أما بالنسبة لتأثير الجليد على هذه الحجارة، فبعد إخضاع عينات منها لإختبارات الشّيخوخة الإصطناعية، عن طريق دورات التّجمّد والدّوبان المسرّعة في المختبر، حيث تمكنا من تنفيذ عدد معين من دورات التّجمّد والدّوبان المقدّرة بـ (14) دورة، مع إجراء الفحوصات اللّازمة لقياس خواصها الفيزيائية والميكانيكية (الكثافة، المسامية والإمتصاص، وسرعة الموجة فوق الصّوتية، ومقاومة الصّغظ أحادي المحور، مؤشر الاستمرارية)، قبل وبعد دورات التّجمّد والدّوبان.

لقد بينت لنا نتائج هذه القياسات أنّ تأثير الجليد لا يظهر على الحجارة إلّا بعد عدد معين من الدّورات من ثلاثة (3) إلى أربعة (4) دورات، قبل هذا الحدّ لا يكفي ضغط البلورات الجليدية المتكونة للتسبب في تدهور الحجارة، وبعد دراسة التّباين من مختلف النّواحي الفيزيائية والميكانيكية والملاحظات البصرية، يمكن أنّ نخلص إلى أهم الأضرار التي لحقت بالحجارة بفعل الجليد فيما يلي:

- تغيير واضح في نسيج المادة الذي أصبح أكثر خشونة؛

- فقدان العينات لصلابتها المترجم بفقدان وزنها، وتناقص أبعادها نتيجة تشقق طبقاتها السّطحية وانفصالها؛

- التّغير في مورفولوجية شبكة المسامية، من خلال زيادة المسامية الكلية، ونسبة الإمتصاص، ودرجة التّشبع بنسب مختلفة حسب صنف الحجارة وصلابتها؛

- خسارة في المقاومة الميكانيكية، المترجم بفقدان مقاومة الصّغظ  $R_c$ ، ومؤشر الإستمرارية، وسرعة الموجة فوق الصّوتية  $V_p$ ، نتيجة زيادة حجم المسام، و/أو تولد شقوق، و/أو توسع تلك الموجودة أو الموروثة مسبقاً.

- حدوث تشقّقات مجهرية والتي يستدل عليها بزيادة مسامية الشّقوق خاصة الحجارة الصّلبة، إلى جانب تفتت وتفكك وتدهور حجارة التّوف الكهفي.

## الخاتمة

كما أنّ الحجارة في الموقع تتعرض إحدى أوجهها للتآلف، بمعنى تتشكّل جبهة تلف واحدة التي تكون وجهها لوجه مع عامل التآلف (الجليد)، على خلاف ما يحدث في الاختبارات المعملية، والتي تتعرض خلالها جميع أوجه العينات للتآلف.

أما بخصوص تأثير الجليد على المسامية، فقد توصلنا إلى وجود علاقة متداخلة، حيث كلما كانت للحجارة مسامية مرتفعة، كلما كانت معرضة بشكل كبير للفعل الإتلافي للجليد، وكلما كان حجم المسام صغيراً جداً، كلما ازدادت شدة الضغوط المتولدة، ومن جهة أخرى، كلما تعرضت الحجارة لعدد كبير من دورات التجمد والذوبان الشديدة والسريعة، كلما زادت مساميتها، وامتصاصها وتشبعها، وفي نفس الوقت تفقد جزء من خواصها الميكانيكية ومقاومتها بشكل متزايد، مما ينعكس سلباً ديمومتها وديمومة الآثار المتشكلة منها.

أما بالنسبة للعوامل المتحكمّة في تلف الحجارة بفعل الجليد، فيمكن اجمالها في عوامل داخلية تتعلق بالخواص الجوهرية للحجارة، من طبيعة تكوينها الفلزي، إلى نوع نسيجها الذي يتحكم في درجة صلابتها، فضلاً عن مورفولوجية مساميتها التي تتحكم في درجة تشبعها، بالإضافة إلى عوامل خارجية تتمثل في الظروف المناخية من درجة الحرارة، والرياح والرطوبة، ناهيك عن ما يوفره التساقط من مصدر للمياه قد توصل الحجارة إلى مرحلة التشبع الحرج، كما لا ننسى دور العيوب التي تتواجد في الحجارة من شقوق وتجاويف وغيرها، والتي تعتبر الفضاءات المفضلة لعمل الجليد.

وتوصلنا من خلال هذه التجارب أنّ الحجارة من صنف العينة ع3 (التوف الكهفي)، تُعد أضعف الحجارة مقارنة بالأنواع الأخرى من الحجارة، والممثلة في العينات ع1 (الحجارة الكلسية الصلبة)، وع2 (حجارة البيوكلاست)، فهي مهددة بفقدان ما تحمله من قيم أثرية وتاريخية وفنية، لذا فهي تتطلب حماية خاصة وتدخلات استعجالية.

ويتمثل أحد التّحديات الرئيسية في مجال الحفاظ على الآثار في اطالة عمرها، بالإضافة إلى تطوير طرق وقائية آمنة تكون غير مكلفة، وفي سبيل تحقيق ذلك وبالنظر إلى حالة حفظ الحجارة والنتائج المتحصل عليها، نوصي بضمان استمرارية حفظ

## الخاتمة

ووقاية الموقع الأثري وذلك بالحرص على اتباع استراتيجية وقائية تقوم على الكشف عن الأخطار وإزالتها من منبعها، تشمل الخطوات التالية:

- تحديد الأخطار التي تهدد معالم الموقع الأثري ومحيطه وتقدير المخاطر المترتبة عنها بشكل دقيق، في أبكر وقت ممكن لتجنب تفاقم التدهور، وتفادي اتخاذ إجراءات وتطبيق مواد غير ضرورية؛

- العمل على التقليل من آثار التلوث، لذا نوصي بالقيام بتنظيف محيط الموقع الأثري الخارجي والداخلي من مختلف مظاهر التلّف (الملوثات، والرّدْم، وغيرها) التي تشوه المظهر العام للموقع بشكل دوري، إلى جانب تنظيف أسطح حجارة المعالم الأثرية من الأتربة والأوساخ المختلفة، بالطرق العلمية الصحيحة، بتنظيف ميكانيكي (سكاكين، مشارط، آلات التنظيف مثل آلات كشط بالهواء، التنظيف بالليزر، الموجات فوق الصوتية)، وفي حالة استحالة تطبيق ذلك أو عدم نجاعة الأسلوب يتم اللجوء إلى التنظيف الكيميائي إذا سمحت طبعاً حالة الحجارة بذلك، مع تجنب قدر الإمكان استخدام الأحماض في التنظيف كونها تعمل على إضعاف مادة الأثر؛

- إصلاح العيوب التي تعاني منها الحجارة، من خلال سدّ النّقوب والشقوق والفجوات، وتثبيت الأجزاء المنفصلة بمادة لاصقة، إلى جانب تقوية الأجزاء الضعيفة والمتآكلة باستخدام مواد مقوية، كما يستحسن استبدال الكتل الحجرية المتدهورة واستكمال الأجزاء الناقصة من المباني الأثرية، فضلاً عن الملاط بمواد سليمة لها نفس الخواص والمكونات والأبعاد؛

- يجب تقوية الحجار التي فقدت تماسكها أو بعض من أجزائها لإعادة ترابطها وتماسكها، فضلاً عن تحسين خواصها، باستخدام مواد التقوية المتناسبة مع خواص الحجارة وأن تقاوم التّقدم الزّمني وتزيد من صلابة الحجارة؛

- حمايتها من التّساقط، والجريان السّطحي، وتسرب مياه الأمطار من خلال تقوية وعزل الأسطح الخارجية بتطبيق مواد عازلة للماء تجعل السّطح طارد للماء، وفي نفس الوقت ترفع

## الخاتمة

من مقاومته وتسمح للحجارة بعملية التنفس الطبيعي، وتحميها من الأثار السلبية للجليد، وتمنع نمو الطحالب والأشنيات والعفن وتشكل البقع والقشور؛

- تجهيز الموقع بوسائل للوقاية أو الحماية من الجليد، قد تكون قائمة على توليد الرياح أو استخراج الهواء البارد، كما يمكن الإستفادة من هذه الآلات في فصل الصيف في تلطيف الجو بتوليد الهواء البارد وطرد الهواء الساخن، وتطبيق النظام القائم على التدفئة بالكابلات في حالة استحالة تطبيق نظام توليد الرياح؛

- نوصي باتخاذ تدابير للتنبؤ والإنذار بحدوث الجليد من خلال تجهيز الموقع بأجهزة لمراقبة التغيرات في درجات الحرارة أو أجهزة الكشف والإنذار بقروب حدوث الجليد، لذا يفضل الاعتماد على أنظمة تعمل بصورة آلية لرصد التغيرات في درجات الحرارة والتساقط والرطوبة، والتي تقدم معلومات يمكن استخدامها لتقييم درجة التغير الذي قد يصيب الحجارة، خاصةً في فصل الشتاء والربيع، وحتى فصل الصيف، توصل مع نظام للوقاية من الجليد يعمل بشكل آلي.



## قائمة المصادر والمراجع

## المصادر والمراجع

- قائمة المراجع باللغة العربية:
- إبراهيم محمد عبد الله، ترميم الآثار الحجرية، دار المعرفة الجامعية للطبع والنشر والتوزيع، مصر، 2012.
- أحمد إبراهيم عطية، ترميم الفسيفساء الأثرية، دار الفجر للنشر والتوزيع، القاهرة، 2003.
- إدوار جي تاربوك وآخرون، ترجمة محمود محمد الوحيدي، الأرض مقدمة في الجيولوجيا الفيزيائية، العبيكان، المملكة العربية السعودية، 2010.
- براك مهدي براك، وآخرون، علم الأرض (الجيولوجيا)، كتاب المعلم الصف 11، الجزء الأول المرحلة الثانية، الطبعة الأولى، دار الترتيبون، الكويت، 2013.
- جودة حسن جودة، أسس الجغرافيا العامة، منشأ المعارف الإسكندرية، 2004.
- حارش محمد الهادي، التاريخ المغاربي القديم (السياسي والحضاري منذ فجر التاريخ إلى الفتح الإسلامي)، المؤسسة الجزائرية للطباعة، الجزائر، 1995.
- حسين علي السعدي، نضال إدريس سليمان، علم الطحالب، اليازوري، الأردن، 2006.
- خلف حُسين الدُلَيْمي، الجيومورفولوجيا التطبيقية، علم شكل الأرض التطبيقي، الأهلية للنشر والتوزيع، المملكة الأردنية، 2001.
- زكي بوزيد، ترجمة الإنعام بيوض، جزائر الأزل، المواقع المدرجة ضمن التراث العالمي، منشورات رياض الفتح الجزائر، 2007.
- سلمان احمد المحاري، المواقع الأثرية في مملكة البحرين، المشاكل والتحديات مقترحات الترميم والصيانة، الموسوعة العربية للدراسات والنشر، ط1، 2009.
- سلمان احمد المحاري، حفظ المباني التاريخية، مباني مدينة المحرق، المركز الإقليمي لحفظ التراث الثقافي في الوطن العربي (إيكروم - الشارقة)، الإمارات العربية المتحدة، 2017.

## المصادر والمراجع

- عبد الرحمان الجيلالي، تاريخ الجزائر العام، الجزء الأول، دار مكتبة الحياة، بيروت 1965.
- عبد القادر عابد، غازي سفاريني، أساسيات علم البيئة، دار وائل للنشر، الأردن، 2002.
- عبد المعز شاهين، ترميم وصيانة المباني الأثرية والتاريخية، مطابع المجلس الأعلى للآثار، مصر، 1994.
- عزت زكي حامد قادوس، علم الحفائر وفن المتاحف، مطبعة الحضري، الاسكندرية، 2008.
- فتحي محمد أبو عيانة، فتحي عبد العزيز أبو راضي، أسس علم الجغرافيا الطبيعية والبشرية، دار المعرفة الجامعية، 1999.
- ليون موريه، ترجمة يوسف خوري، عبد الرحمان حميدة، الوجيز في الجيولوجيا، الطبعة الأولى، دار طلاس، دمشق، 1998.
- محمد أحمد حسن هيكل، عبد الجليل عبد الحميد هويدي، أساسيات الجيولوجيا الفيزيائية، مكتبة الدار العربية للكتاب، 2008.
- محمد رضا على إبراهيم، الجيولوجيا (علم الأرض)، رؤية عميقة لموضوعات علم الجيولوجيا في مقرر التعليم العام، مكتبة، القاهرة ب ت.
- محمد صبري محسوب، محمد إبراهيم أرياب، الأخطار والكوارث الطبيعية، الحدث والمواجهة، معالجة جغرافية، ط1، دار الفكر العربي، 1998.
- محمد صفى الدين، قشرة الأرض دراسة مورفولوجية، الطبعة 2، دار الطباعة الحديثة، مصر، 1965.
- محمد عبد الهادي، دراسات علمية في ترميم وصيانة الآثار غير العضوية، مكتبة زهراء الشرق، مصر، بدون تاريخ.

## المصادر والمراجع

- ناصر سعيد الجهوري، مهددات التراث الأثري في سلطنة عمان، كلية الآداب والعلوم الإجتماعية، جامعة السلطان قابوس، 2010.
- نورة عبد التواب السيد، مبادئ الجيومورفولوجيا، مكتبة الأنجلو المصرية، ط1، القاهرة، 2008.
- هاني عبد القادر عمارة، الماء بين العلم والإيمان، زهراء للنشر والتوزيع، عمان، 2011.
- الرسائل الجامعية:
- بلعبيود بدر الدين، دراسة فعالية تقوية الحجارة الأثرية، أطروحة دكتوراه، معهد الآثار، جامعة الجزائر 02، 2014.
- حجاج كهينة، طرق تموين مدينة كويكول (جميلة) بالمياه في العهد الروماني « دراسة وصفية معمارية» ، رسالة ماجستير، جامعة الجزائر 2، 2010.
- عاطف صالح، وضع خطة تنمية ضمن أبعادها البيئية بولاية سطيف، رسالة ماجستير، جامعة قسنطينة، 2005.
- عيساوي بوعكاز، طرق حفظ وصيانة مواد بناء الموقع الأثري جميلة" كويكول" حالة الحجارة الكلسية، رسالة ماجستير في الصيانة والترميم، جامعة الجزائر، 2009.
- فوزية سعاد بوجلابة، أخطار التلوث البيئي على المعالم الأثرية بمدينة وهران وتلمسان، أطروحة دكتوراه، جامعة أبي بكر بلقايد، تلمسان، 2015.
- منصور هجرس، إشكالية التخلف وجهود التنمية في البلديات الجبلية لولاية سطيف حالة بلديات (عين الكبيرة، دهامشة، أولاد عدوان، عموشة، تيزي نبشار، واد البارد)، رسالة ماجستير، جامعة قسنطينة، 2008.
- نبيل سليمان، تصميم وتنفيذ مشروع نظام معلومات جغرافي لتسيير المجال في ولاية سطيف، رسالة ماجستير، جامعة قسنطينة، 2009.

## المصادر والمراجع

### -المقالات :

- أمير عبد الرحمن هلال الدليمي، (الكشف عن عيوب الخرسانة باستخدام سرعة الموجات فوق الصوتية)، المجلة العراقية للهندسة المدنية المجلد 6 العدد 3، 2010، ص ص 1-13.
- 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، ص ص 147-148.
- فؤاد خضرة، رنا غره، (داسة في استخدامات الإكساء الحجري وملائمته، أبنية مدينة اللاذقية ومناخها) ، مجلة جامعة تشرين للبحوث والدارسات العلمية، سلسلة العلوم الهندسية المجلد(63)، العدد(04)، سوريا، 2014، ص ص 57-78.
- محمد العيد مشري، إسماعيل شيحي، (تأثير الحرارة على الأطوار البلورية في رمل كثبان منطقة ورقلة)، حوليات العلوم والتكنولوجيا، جامعة ورقلة، الجزء 6، العدد2، 2014، ص ص 173-177.
- 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 السلیمانية)، مجلة تكريت للعلوم الصرفة، المجلد الثالث 20، العدد 5، 2015، ص ص 106-116.

### - التقارير:

- الديوان الوطني للأرصاد الجوية للجزائر العاصمة، معطيات المناخية (الحرارة، والرطوبة، والتساقط والجليد، والرياح والثلوج) للفترة الممتدة من سنة 1996 إلى 2008.
- على عباس، الصقيع التنبؤ بحدوثه ومقاومته، وزارة الإصلاح الزراعي، ط 2، سوريا، بدون تاريخ.

## المصادر والمراجع

### -المراجع باللغة الأجنبية:

- **Allais, Yvonne**, Djemila, Algérie, 1938.
- Berque Jacques**, art antique et art musulman en Algerie, Strasbourg, 2003.
- Blas De Roblès Jean-Mari, Sintes Claude**· Sites et monuments antiques de l'Algérie, Edisud, 2003
- Février Paul-Albert**, Djemila, direction des arts, musées, monuments historique, antiquités. Alger ,2<sup>eme</sup> édition, 1978.
- Gsell Stéphane**, les monuments antiques de l'Algérie, T1, Paris, 1901.
- ICOMOS –ISCS-** Illustrated glossary on stone deterioration patterns, english - arabic version, office des publications universities, Alger 2016.
- Michèle Blanchard-lamée**, Maisons à mosaïques du quartier central de Djemila ,Aix-en-Provence, 1975.
- Rami Abou Sleiman, et all**, dictionnaire des termes scientifiques (anglais, français, arabe), dar al kotob al ilmiyah, Bierut Lebanon, 2007.
- Wieslaw Domaslawski**, Conservation préventive de la Pierre, traduit par Woszyck Irena, UNESCO, Paris, 1982.

### -الرسائل الجامعية :

- Adrian Rodriguez Garcia**, étude de la congélation comme technique de traitement des eaux : applications spécifiques, thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Toulouse, France 2004.
- Anne Marie Leydier-Bareil**, les arcs de triomphe dediesa Caracalla en afrique romaine, Thèse de doctorat en histoire de l'art et archéologie, université Nancy2, France 2006.
- Boukhenouf Arezki**, caractérisation des mortiers archéologiques, le cas des sites historiques de Djemila et de la citadelle d'Alger, mémoire de magister, université de Boumerdes ,2006.
- **Céline Thomachot** ‘Modifications des propriétés pétrophysiques de grès soumis au gel ou recouverts "d'encroûtements noirs vernissés, thèse de doctorat, université louis pasteur de Strasbourg, France, 2002.



## المصادر والمراجع

---

- **Charlotte Walbert**, Endommagement par le gel de pierres calcaires utilisées dans le patrimoine bâti : étude du comportement hydromécanique, thèse de doctorat, université de Cergy-pontoise, France ,2015.
- **Claire Moreau**, vieillissement naturel en milieu urbain de pierres calcaires hydrofugées : évaluation de la durabilité des traitements et de leur impact sur le nettoyage, thèse doctorat Sciences de la Terre, université de Reims Champagne-Ardenne, France, 2008.
- **Damien Linoir**, Les horizons d'accumulations carbonatées (HAC) en Champagne-Ardenne, répartition régionale, caractérisation et conséquences sur les transferts hydriques, thèse de doctorat, université de Reims Champagne-Ardenne, France, 2014.
- **Julien Berger**, Contribution à la modélisation hygrothermique des bâtiments, application des méthodes de réduction de modèle, thèse de doctorat, université de Grenoble, France 2014.
- **Kaabeche Tahar, Mebrak Abderraouf**, contribution à l'étude des risques naturels (sismiques et mouvements de terrain) dans la wilaya de Sétif, mémoire de d'ingénieur en géologie, université Ferhat Abbas, Sétif, 2010.
- **Kevin Beck**, étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité, thèse de doctorat en sciences des Matériaux, université d'Orléans, France, 2006.
- **Marion Bost**, 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, 2008.
- **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, université de Cergy pontoise, France, 2014.
- **Rana, Ezzedine**, endommagement des monuments historiques en maçonnerie, thèse de doctorat, université Bordeaux 1, France, 2005.
- **Saad Alice**, influence du changement climatique et des conditions extrêmes sur les massifs fractures, rôle des fluides dans leur processus d'altération, thèse de doctorat, université Paris-est, France, 2011.

## المصادر والمراجع

---

- **Samia Hannachi**, évaluation de la résistance à la compression du béton sur site : application de la méthode combinée, thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine1, 2015.
- **Sarah Janvier Badosa**, le carnet de santé d'un monument, application au château de Chambord, thèse de doctorat, université d'Orléans, France, 2012.
- **Sébastien Bouteille**, outils de caractérisation et analyse du comportement des matériaux cimentaires soumis à des cycles de gel-dégel en présence de sels, thèse de doctorat, université Paris-est, France, 2013.
- **Tayeb Brouri**, Elaboration et étude des propriétés électriques de couches minces et de nano fils de ZnO, thèse de doctorat, Université Paris-Est, France, 2011.
- **Virolleaud François**, Le ravalement : guide technique, réglementaire et juridique, Le moniteur, 2011, p191, d'après Frédéric Magnent, Proposition de méthodologie pour la conservation des murs anciens en Maçonnerie de pierre, mémoire de d'ingénieur, conservatoire national des arts et métiers (CNAM), Paris, 2013.

### -المقالات-

- Boukhenouf Arezki**, (Histoire de conservation et restauration de l'arc de Karakalla de Djemila), revue athar n° 9, université d'Alger 2, 2009, pp 63,74.
- Cesareo Saiz-Jimenez**, (Biodiversity of cyanobacteria and green algae on monuments in the Mediterranean Basin): an overview, Microbiology 155, SGM, Britain, 2009pp 3476–3490.
- Duval Noël**, (Djemila, Encyclopédie berbère), Djalut – Dougga, volumes16, 1995. pp2442-2449
- Freire-Lista David Martín et all**, (Freeze- thaw, fracturing in building granites), cold regions science and technology, doi: 10.1016/j.coldregions,201,pp 40-51.

## المصادر والمراجع

---

**Martin ondrášik, miloslav kopecký**, (rock pore structure As main reason of rock deterioration), studia geotechnica et mechanica, Vol. XXXVI, No. 1, 2014 pp 79-88.

**Zbigniew Rusina, Przemysław Świercza, Zdzisława Owsiaka**, «Effect of microstructure on frost durability of rock in the context of diagnostic needs», procedia engineering 108, akielce university of technology poland, 2015, pp177 – 184.

**Zita Pápay, Ákos Török**, « Effect of thermal and freeze-thaw stress on the mechanical properties of porous limestone», periodica polytechnica civil engineering, 62(2), 2018, pp 423-428.

– التقارير

**Alain Lootvoet**, les pierres altération- traitements, ministère de l'urbanisme du logement et des transports, France, 1986.

**Alexandre Caussarieu, Thomas Gaumart**, guide pratique de la rénovation de façades pierre, béton, brique, Groupe Eyrolles, 2005, p6.

**Allais Yvonne**, le quartier occidental de Djemila (Cuicul) In Antiquités africaines, 1971.

**Baroghel-Bouny Véronique et all et all**, Guide technique, recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel, Laboratoire central des ponts et chaussées, France, 2003.

**Blanchard Lemée (M)**, La maison de Baccus a Djemila, Bulletin archéologique du C.T.H.S. Paris 1984

**Centre d'étude et de réalisations en urbanisme SPA (URBAB-Sétif)** , plan occupation des sols de commune Djemila, phase 3, Sétif ,2014.

**Centre d'études et de réalisations en urbanisme SPA (URBAB- Sétif)**, Révisions le plan directeur d'aménagement et d'urbanisme commune de Djemila, phase finale, Sétif ,2010.

## المصادر والمراجع

---

**Esméralda de Luis**, en la frontera romana de la antigua numidiai – Cuicul (Djemila - Argelia), centro europeo para la difusión de las ciencias sociales (CEDCS), España, 2013.

**Dessandier David, 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.

**Hartwig Schmidt**, La reconstruction de bâtiments anciens, Actes de conference international sur la conservation des sites archeologiques dans la region mediterraneenne, l'institut de conservation Getty, Etats-Unis D'amerique 1997.

**Institut Universitaire des métiers et du patrimoine**, Les pathologies dans le bâti ancien, France, 2011.

**Jean-François Daïan**, Equilibre et transferts en milieux poreux Première partie - états d'équilibre, France, 2010

**Joël Rochard et all**, Itinéraires N° 27, La Grêle et le gel de printemps : Comment s'en Protéger, L'institut Français de la vigne et du vin, France ,2018

**Marion Bost, Ahmad Pouya, François Martineau**, Effets mécaniques du gel sur l'évolution d'une fissure dans un bloc de calcaire, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG), France, 2006,

**Monceaux Paul**, Découverte d'un groupe d'édifices chrétiens à Djemila, comptes rendus des séances de l'académie des inscriptions et belles-lettres, 66<sup>e</sup> année, N.5, 1922.

**Norme européenne EN 12371**, méthodes d'essai pour pierres naturelles - détermination de la résistance au gel, comité européen de normalisation(CEN), Bruxelles, 2010.

**Philippe Bromblet**, Guide « altérations de la pierre » association medistone, France 2010.

**Rouques Gilles, Caniard loic**, gel et dégel des chaussées, note d'information technique, laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), Paris, 1975

**Tourenq Claude**, la gélivité des roches application aux granulats, rapport de recherche n° 6, ministre de l'équipement et du logement, France, 1970.

## المصادر والمراجع

---

### مواقع الإنترنت:

<http://www.climakiwi-france.fr/index1.html>

[http://www.legacy.lib.utexas.edu/maps/ams/north\\_africa/txu-oclc-6949452-nj31-16.jpg](http://www.legacy.lib.utexas.edu/maps/ams/north_africa/txu-oclc-6949452-nj31-16.jpg),adaptée et modifiée

[http://www.representatives.spectro.com/spectro-france/products/xrf?gclid=cj0kcqiaurjgbrcqarisad09sg-exz5upz5kfvio6qpu95mjxygvvxybpurweeydsmpiktccnw32lgmaaqrrealw\\_wcb](http://www.representatives.spectro.com/spectro-france/products/xrf?gclid=cj0kcqiaurjgbrcqarisad09sg-exz5upz5kfvio6qpu95mjxygvvxybpurweeydsmpiktccnw32lgmaaqrrealw_wcb)

<https://www.frostprotection.com>

[https://ar.decorexpro.com/krysha/obogrev/-](https://ar.decorexpro.com/krysha/obogrev/)

<http://strport.ru/stroitelstvo-domov/obogrev-vodostokov-i-krovli-sistemy-antiobledeneniya-svoimi-rukami>

<https://patter.ru/ar/insulation-and-insulation/roof-heating-system-roof-with-electric-heating-photos-and-video-all-about-modern-systems-of-electric-heating-of-a-roof-a-roof-and-watercourses/>

<https://www.samm.com/ar/product/1137/>

[https://www.scribblemaps.com/create/#/lat=36.52410313350053&lng=5.22150404729759&z=9&t=customstyle\\_](https://www.scribblemaps.com/create/#/lat=36.52410313350053&lng=5.22150404729759&z=9&t=customstyle_)

<https://www.viamichelin.fr/web/Hotels?geoboundaries=36.304958,5.7160664:36.3254639,5.7594967>

الملاحق

---

الملاحق



# الملاحق

---

ملحق I: الوثائق الإدارية

# الملاحق



## الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية وزارة الثقافة

الدوائن الوطني لتسيير  
وإستغلال الممتلكات  
الثقافية المحمية  
مؤسسة عمومية ذات طابع  
صناعي و تجاري تحت  
وصاية وزارة الثقافة

الجزائر في 17/04/2017

المرجع: م ج ص ح / 17 / 2017

Office national  
de gestion et d'exploitation  
des biens culturels protégés  
Etablissement Public à caractère  
Industriel et Commercial sous tutelle  
du Ministère de la Culture

إلى السيد: مسؤول موقع و متحف جميلة الأثري

الموضوع: رخصة

بناء على التزكية الممنوحة للطالب جمال موساوي بهدف تحضير أطروحة

دكتوراه تخصص صيانة و ترميم، نحن مدير الجرد، الصيانة و الحفظ نرخص

للتطلب المذكور اسمه أعلاه بـ:

- أخذ صور فوتوغرافية لموقع جميلة

- إنجاز رفع أثري لمعالم الموقع

ملاحظة: عدم السماح بالمساس المباشر للأثار قصد اقتلاع عينات، مع المرافقة

المستمرة للتطلب.

المديرية العامة:  
دار عزيزة، 02، ساحة ابن باديس،  
القصبة السفلى، الجزائر، 16000

Direction Générale:  
Dar Aziza, 02, Place Ben Badis  
Basse-Casbah, Alger, 16000

تقبلوا منا فائق الاحترام و التقدير

الهاتف: Tél.  
+213/(021).43.04.07  
+213/(021).43.04.73  
+213/(021).43.00.05  
الفاكس: Fax  
+213/(021).43.98.22  
+213/(021).43.76.98  
+213/(021).43.00.05

الموقع: Site  
www.ogebc.dz  
www.ogebc.net



AIT AISSI EL HACHEMI  
Directeur de l'Inventaire de la Maintenance  
de la Conservation des biens Culturels  
Protégés par Intérim

# الملاحق



République Algérienne Démocratique et Populaire  
SPA CRAPC Expertise  
Filiale Du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyse Physico-Chimiques -MESRS-  
Capital Social : 7 000 000 DA  
Adresse : Frères Belhadj Bou-Ismaïl (w) Tipaza  
Tél/Fax : 024 32 58 93 / 024 31 41 41 Mail: [contact@crapcexpertise.com](mailto:contact@crapcexpertise.com)

## Bulletin d'Analyse N° 0000243/2018/ SPA CRAPC EXPERTISE Du 02/12/2018

N° du Dossier : 0000961/2018 Relatif à l'analyse d'un échantillon par FRX.

Date d'Enregistrement : 22/11/2018

Demandeur : **Mr MOUSSAOUI**

Adresse :

RC N° :

NIF N° :

NIS N° :

ART N° :

### I. Conditions d'analyse :

- **Type d'échantillon** : Oxyde/Poudre.
- **Marge d'analyse** : B-U.
- **Diamètre** : 20 mm
- **Temps de mesure** : Normal.

### II. Résultats :

Les résultats sont regroupés ci-joint.

**CACHET ET SIGNATURE**  
Bou- Ismaïl, le : 02/12/2018

**LAARABA Rachid**

**Directeur Technique**



# الملاحق



République Algérienne Démocratique et Populaire  
SPA CRAPC Expertise  
Filiale Du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyse Physico-Chimiques-MESRS-  
Capital Social : 7 000 000 DA  
Adresse : Frères Belhadj Bou-Ismaïl (w) Tipaza  
Tél/Fax : 024 32 58 93 / 024 31 41 41 Mail: [contact@crapcexpertise.com](mailto:contact@crapcexpertise.com)

## Bulletin d'Analyse N° 0000243/2018/ SPA CRAPC EXPERTISE Du 02/12/2018

N° du Dossier : 0000961/2018 Relatif à l'analyse d'un échantillon par FRX.

Date d'Enregistrement : 22/11/2018

Demandeur : **Mr MOUSSAOUI**

Adresse :

RC N° :

NIF N° :

NIS N° :

ART N° :

### I. Conditions d'analyse :

- Type d'échantillon : Oxyde/Poudre.
- Marge d'analyse : B-U.
- Diamètre : 20 mm
- Temps de mesure : Normal,
- Equipement utilisé : Spectromètre de Fluorescence des Rayons X "ZSX Primus II Rigaku"

### II. Résultats :

Les résultats sont regroupés ci-joint.

CACHET ET SIGNATURE

Bou- Ismail, le : 02/12/2018

LAARASA  
Directeur Technique



# الملاحق



République Algérienne Démocratique et Populaire  
SPA CRAPC Expertise  
Filiale Du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyse Physico-Chimiques -MESRS-  
Capital Social : 7 000 000 DA  
Adresse : Frères Belhadj Bou-Ismaïl (w) Tipaza  
Tél/Fax : 024 32 58 93 / 024 31 41 41 Mail: [contact@crapcexpertise.com](mailto:contact@crapcexpertise.com)

## Bulletin d'Analyse N° 0000242/2018/ SPA CRAPC EXPERTISE Du 02/12/2018

N° du Dossier : 0000961/2018 Relatif à l'analyse de trois échantillons par DRX  
Date d'Enregistrement : 22/11/2018  
Demandeur : **Mr MOUSSAOUI**  
Adresse :  
RC N° :  
NIF N° :  
NIS N° :  
ART N° :

### I. Conditions d'analyse :

Les paramètres d'analyse choisis sont les suivants :

- **Echantillon :**
  - Nature de l'échantillon : tif volcanique.
  - Date d'analyse : 28.11.2018.
  - Durée de la mesure : 40min par échantillon.
- **Conditions de mesure :**
  - Rayon du goniomètre : 280 mm.
  - Géométrie du goniomètre : focalisation de Bragg-Brentano  $\theta/\theta$ .
  - Domaine de  $2\theta$  : de  $5^\circ$  à  $100^\circ$ .
  - Taille du pas :  $0.020^\circ$ .
- **Longueur d'onde :**
  - Anode : Cu.FRX
  - $K\alpha 1$  : 1.54060 Å.
  - $K\alpha 2$  : 1.54439 Å.
  - Longueur d'onde pour l'affichage du scan : 1.5406 Å.
- **Générateur de rayons X :**
  - Tension du générateur : 40 KV.
  - Courant : 25 mA.
- **Détecteur :**
  - Nom du détecteur : SSD160 mode (1D).
  - Ouverture PSD :  $2.421^\circ$ .

### II. Identification des résultats :

Le traitement des résultats et l'identification des phases ont été réalisés par le logiciel **DIFFRAC.EVA V4.0** en comparant les patterns de la base de données **PDF-2 2004** avec les scans enregistrés.

### III. Résultats d'analyse :

Les résultats sont regroupés ci-joint.

CACHET ET SIGNATURE  
Bou- Ismaïl, le : 02/12/2018

LAARABA Rachid  
Directeur Technique



RC N°: 42/00-0524325B13 NIF N°: 001342052432552 NIS N°: 001342260014166 N° Article : 42260119851  
N° Compte Bancaire : 00400184401001356312/CPA Agence Tipasa (00184)

# الملاحق

---

ملحق II: البنات التفصيلية المرفقة لتحليل المعدي والمخبرية



# الملاحق

## الملحقات الخاصة لانعراج الاشعة السنوية على العينة ع1 ( للكالسيت )

Pattern : PDF05-0586

Radiation : 1,54060

Quality : Etoil (\*)

Formula : Ca C O3		d	3θ	I <sub>fix</sub>	h	k	L
Name : Calcium Carbonate		3,86	23,022	12	0	1	2
Name (minéral) : Calcite, syn		3,035	29,406	100	1	0	4
Name		2,845	31,418	3	0	0	6
Common		2,495	35,966	14	1	1	0
		2,285	39,402	18	1	1	3
		2,095	43,146	18	2	0	2
		1,927	47,124	5	0	2	4
Lattice : Rhombo. axe H		1,913	47,49	17	0	1	8
S,G : R-3c(167)		1,875	48,514	17	1	1	6
Mol. Weight = 100,09		1,626	56,555		2	1	1
Volume[CD] = 367,78		1,604	57,402	8	1	2	2
DX=		1,587	58,075	2	1	0	10
Dm= 2,71		1,525	60,678	5	2	1	4
I/cor = 2,00		1,518	60,987	4	2	0	8
a= 4,98900	Alpha =	1,51	61,345	3	1	1	9
b=	Beta =	1,473	63,06	2	1	2	5
c= 17,06200	gamma=	1,44	64,678	5	3	0	0
a/b=1,00000	Z = 6	1,422	65,599	3	0	0	12
c/b = 3,41992		1,356	69,231	1	2	1	7
Optical Data: A=1.487, B=1.659, Sign=-		1,339	70,238	2	0	2	10
General Comments: Additional weak reflections [indicated by brackets] were observed		1,297	72,87	2	1	2	8
Color: Colorless		1,284	73,729	1	3	0	6
Additional Pattern: See ICSD 16710, 20179, 28827, 18164,		1,247	76,3	1	2	2	0
18165 and 18166 (PDF 01-072-1214 and 01-072-1937); ICSD		1,235	77,177	2	1	1	12
73446 (PDF 01-081-2027); ICSD 79673 (PDF 01-083-0577);		1,1869	80,933	1	3	1	2
ICSD 79674 (PDF 01-083-0578)		1,1795	81,547	3	2	1	10
Sample Source Or Locality: Sample from Mallinckrodt Chemical Works		1,1728	82,113	1	0	1	14
Analysis: Spectroscopic analysis: <0.1% Sr; <0.01% Ba;		1,1538	83,767	3	1	3	4
<0.001% Al, B, Cs, Cu, K, Mg, Na, Si, Sn; <0.0001% Ag, Cr, Fe, Li, Mn		1,1425	84,788	1	2	2	6
Temperature Of Data Collection: Pattern taken at 26 C		1,1244	86,483	1	1	2	11
General Comments: Other form: aragonite		1,0613	93,072	1	2	0	14
General Comments: Pattern reviewed by Parks,J, McCarthy, G, North Dakota		1,0473	94,701	3	4	0	4
State Univ, Fargo, North Dakota, USA, ICDD Grant-in-Aid (1992)		1,0447	95,011	4	3	1	8
General Comments: Agrees well with experimental and		1,0352	96,165	2	1	0	16
		1,0234	97,647	1	2	1	13
Référence primaire		1,0118	99,161	2	3	0	12
Publication: Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539 Détails : volume II, page 51 (1953)		0,9895	102,242	1	3	2	1
Auteurs: Swanson, Fuyat.		0,9846	102,952	1	2	3	2
		0,9782	103,899	1	1	3	10
Radiation : CuKα1	Filter: F	0,9767	104,124	3	1	2	14
Wavelength : 1,54060	d-spacing :	0,9655	105,846	2	3	2	4
SS/FOM : 57,2 (0,0159;33)		0,9636	106,145	4	0	4	8
		0,9562	107,333	1	0	2	16
		0,9429	109,561	2	4	1	0
		0,9376	110,484	2	2	2	12

# الملاحق

الملحقات الخاصة لانعراج الأشعة السينية على العينة ع<sub>1</sub> (الكوارتز)

Pattern : PDF 05-0490

Radiation : 1,54060

Quality : Etoil(\*)

Formula : SiO <sub>2</sub>			d	2θ	I fix	h	k	L
Name : Silicon Oxide			4,26	20,835	36	1	0	0
Name (minéral) : Quartz, low			3,343	26,644	101	1	0	1
Name :			2,458	36,527	12	1	1	0
Common :			2,282	39,456	12	1	0	2
			2,237	40,284	6	1	1	1
			2,128	42,444	9	2	0	0
			1,98	45,79	6	2	0	1
Lattice : Hexagonal			1,817	50,167	17	1	1	2
S,G : P3121 (152)			1,801	50,644	1	0	0	3
Mol. Weight = 100,09			1,672	54,865	7	2	0	2
Volume [CD] = 367,78			1,659	55,332	3	1	0	3
DX=			1,608	57,246	1	2	1	0
Dm= 2,71			1,541	59,983	16	2	1	1
l/lcor = 2,00			1,453	64,03	3	1	1	3
A = alpha=			1,418	65,808	1	3	0	0
4,91300			1,382	67,75	7	2	1	2
B = beta =			1,375	68,142	11	2	0	3
C = Gamma =			1,372	68,311	9	3	0	1
5,40500			1,288	73,462	3	1	0	4
a/b = Z = 6			1,256	75,656	4	3	0	2
1,00000			1,228	77,699	2	2	2	0
c/b =			1,1997	79,894	5	2	1	3
1,10014			1,1973	80,086	2	2	2	1
Deleted By or Rejected By: Deleted by 00-033-1161			1,1838	81,189	4	1	1	4
Additional Pattern : To replace 00-001-0649			1,1802	81,489	4	3	1	0
			1,153	83,839	2	3	1	1
			1,1408	84,944	1	2	0	4
			1,1144	87,454	1	3	0	3
			1,0816	90,826	4	3	1	2
			1,0636	92,811	1	4	0	0
			1,0477	94,653	2	1	0	5
			1,0437	95,131	2	4	0	1
			1,0346	96,239	2	2	1	4
			1,0149	98,751	2	2	2	3
Référence primaire			0,9896	102,228	2	1	1	5
Publication: Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539			0,9872	102,574	2	3	1	3
Auteurs: Swanson, Fuyat.			0,9781	103,914	1	3	0	4
			0,9762	104,199	1	3	2	0
Radiation : Cu			0,9607	106,607	2	3	2	1
Filter : Non spécifié			0,928	112,211	1	4	1	0
Wavelength : 1,54060								
SS/FOM : 77,4 (0,0125;31)								

# الملاحق

الملحقات الخاصة لانعراج الاشعة السنية على العينة ع<sub>2</sub> (الكالسيت)

Pattern : PDF 86-2335

Radiation : 1,54060

Quality : calculé(\*)

Formula : ( Mg <sub>0,64</sub> Ca <sub>936</sub> ) CO <sub>3</sub>		d	2θ	I fix	h	k	L
Name Magnesium Calcium Carbonate		3,83655	23,165	94	0	1	2
Name (minéral) : Calcite, Magnesium		3,02003	29,555	1000	1	0	4
Name		2,82718	31,622	20	0	0	6
Common		2,48365	36,136	136	1	1	0
		2,27395	39,601	176	1	1	3
		2,08491	43,365	147	2	0	2
		1,91827	47,351	61	0	2	4
Lattice: Rhombo. axe H		1,9019	47,784	177	0	1	8
S, G : R-3c(167)		1,86591	48,765	186	1	1	6
Mol. Weight = 99,08		1,61851	56,84	30	2	1	1
Volume[CD] = 362,47		1,59685	57,683	80	1	2	2
DX=		1,57805	58,436	10	1	0	10
Dm= 2,72		1,51817	60,98	50	2	1	4
I/lcor = 3,05		1,51001	61,345	21	2	0	8
a= 4,96730	alpha=	1,50141	61,735	21	1	1	9
b=	beta =	1,46624	63,385	17	1	2	5
c= 16,93610	gamma=	1,43394	64,985	53	3	0	0
a/b = 1,00000	Z = 6	1,41359	66,039	28	0	0	12
c/b = 3,41495		1,35018	69,573	9	2	1	7
ICSD Collection Code : 040108		1,33194	70,666	17	0	2	10
Temperature Factor : ATF		1,29026	73,312	25	1	2	8
Remark From ICSD/CS D : REM M PDF 43-697		1,27885	74,075	6	3	0	6
Test From ICSD : Calc. density unusual but tolerable		1,24182	76,676	11	2	2	0
Sample Source Or Locality: Specimen from the spine of an echinoid		1,22854	77,659	17	1	1	12
Article Title: Single-crystal X-ray structure refinements of two biogenetic magnesian calcite crystals		1,21292	78,852	1	2	2	3
Wyckoff Sequence: e b a (R3-CH)		1,19017	80,664	1	1	3	1
ANX : ABX3		1,18147	81,383	4	3	1	2
Structure		1,1738	82,028	19	2	1	10
Publication : Am. Minéral.		1,16627	82,673	3	0	1	14
Détails : volume 75, page 1151 (1990)		1,14852	84,241	35	1	3	4
Auteurs: Paquette, J., Reeder, R.J.		1,13698	85,297	14	2	2	6
Référence primaire		1,12553	86,375	1	3	1	5
Publication : Calculated from ICSD using POWD-12++		1,11889	87,015	3	1	2	11
Radiation : CuKα1	Filter: Non spécifié						
Wavelength : 1,54060	d-spacing :						
SS/FOM : 999,9 (0;30)							

# الملاحق

الملحقات الخاصة لانعراج الأشعة السينية على العينة ع2 (للكوارتز)

Pattern : PDF 82-0511 Radiation :1,54060

Quality : Hypothétique

		d	2θ	I fix	h	k	L
Formula :	SiO <sub>2</sub>	4,21321	21,069	245	1	0	0
Name :	Silicon Oxide	3,3317	26,736	999	1	0	1
Name (minéral) :	Quartz	2,4325	36,923	68	1	1	0
Name		2,28605	39,383	82	0	1	2
Common		2,22081	40,59	44	1	1	1
		2,10661	42,896	58	2	0	0
		1,9646	46,169	27	0	2	1
Lattice :	Hexagonal	1,81364	50,267	89	1	1	2
S,G :	P3121 (152)	1,81364	50,267	89	0	0	3
	Mol. Weight = 60,08	1,66585	55,085	59	2	0	2
	Volume[CD] = 111,57	1,59244	57,858	2	2	1	0
	DX=	1,52838	60,53	70	2	1	1
	Dm=	1,45434	63,964	18	1	1	3
a= 4,86500	alpha=	1,4044	66,527	2	3	0	0
b=	beta =	1,37444	68,173	88	2	1	2
c= 5,44300	gamma=	1,37444	68,173	88	0	2	3
a/b= 1,00000	Z = 6	1,35987	69,006	42	3	0	1
c/b= 1,11881		1,29489	73,008	21	0	1	4
	I/lcor = 3,030	1,24803	76,226	19	0	3	2
ICSD Collection Code: 074529		1,21625	78,594	7	2	2	0
Hypothetical Structure: Structure calculated theoretically		1,19683	80,124	24	1	2	3
Remark From ICSD/CSD: REM F Origin shift of .3333 along c-axis.		1,18756	80,878	20	2	2	1
Test From ICSD: No R value given		1,18756	80,878	20	1	1	4
Test From ICSD: At least one TF missing		1,16854	82,478	23	3	1	0
Additional Pattern: See PDF 00-046-1045		1,1425	84,788	7	3	1	1
		1,1425	84,788	7	0	2	4
Article Title: Crystal-structure calculation with distorted ions Wyckoff Sequence: c a (P3121)		1,11057	87,833	2	2	2	2
ANX: AX2		1,11057	87,833	2	0	3	3
Structure							
Publication: Phys. Rev. B: Condens. Matter							
Détails: volume 48, page 2889 (1993)							
Auteurs: Lacks, D.J., Gordon, R.G.							
Référence primaire							
Publication: Calculated from ICSD using POWD-2++							
Radiation : Cu	Filter: F						
Wavelength : 1,54060	d-spacing						
SS/FOM : 77,4 (0,0125;31)							

# الملاحق

الملحقات الخاصة لانعراج الاشعة السنوية على العينة ع3 للكالسيت

Pattern : PDF 05-0586

Radiation : 1,54060

Quality : Etoil(\*)

Formula : Ca C O3		d	2θ	I fix	h	L
Name Calcium Carbonate		3,8600	23,022	12	0	1
Name (minéral) : Calcite, syn		3,035	29,406	100	1	0
Name		2,845	31,418	3	0	0
Common		2,495	35,966	14	1	1
		2,285	39,402	18	1	1
		2,095	43,146	18	2	0
		1,927	47,124	5	0	2
Lattice : Rhombo. axe H		1,913	47,49	17	0	1
S,G : R-3c(167)		1,875	48,514	17	1	1
Mol. Weight = 100,09		1,626	56,555	4	2	1
Volume[CD] = 367,78		1,604	57,402	8	1	2
DX=		1,587	58,075	2	1	0
Dm= 2,71		1,525	60,678	5	2	1
I/lcor = 2,00		1,518	60,987	4	2	0
a= 4,98900	alpha=	1,51	61,345	3	1	1
b=	beta =	1,473	63,06	2	1	2
c= 17,06200	gamma=	1,44	64,678	5	3	0
a/b = 1,00000	Z = 6	1,422	65,599	3	0	0
c/b = 3,41992		1,356	69,231	1	2	1
Optical Data: A=1.487, B=1.659, Sign=-		1,339	70,238	2	0	2
General Comments: Additional weak reflections [indicated by brackets] were observed		1,297	72,87	2	1	2
Color: Colorless		1,284	73,729	1	3	0
Additional Pattern: See ICSD 16710, 20179, 28827, 18164,		1,247	76,3	1	2	2
18165 and 18166 (PDF 01-072-1214 and 01-072-1937); ICSD		1,235	77,177	2	1	1
73446 (PDF 01-081-2027); ICSD 79673 (PDF 01-083-0577);		1,1869	80,933	1	3	1
ICSD 79674 (PDF 01-083-0578)		1,1795	81,547	3	2	1
Sample Source Or Locality: Sample from Mallinckrodt Chemical Works		1,1728	82,113	1	0	1
Analysis: Spectroscopic analysis: <0.1% Sr; <0.01% Ba;		1,1538	83,767	3	1	3
<0.001% Al, B, Cs, Cu, K, Mg, Na, Si, Sn; <0.0001% Ag, Cr, Fe,		1,1425	84,788	1	2	2
Li, Mn		1,1244	86,483	1	1	2
Temperature Of Data Collection: Pattern taken at 26 C		1,0613	93,072	1	2	0
General Comments: Other form: aragonite		1,0473	94,701	3	4	0
General Comments: Pattern reviewed by Parks, J., McCarthy,		1,0447	95,011	4	3	1
G., North Dakota State Univ., Fargo, North Dakota, USA, ICDD Grant-in-Aid (1992)		1,0352	96,165	2	1	0
General Comments: Agrees well with experimental and		1,0234	97,647	1	2	1
Référence primaire		1,0118	99,161	2	3	0
Publication: Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539		0,9895	102,242	1	3	2
Détails: volume II, page 51 (1953)		0,9846	102,952	1	2	3
Auteurs: Swanson, Fuyat.		0,9782	103,899	1	1	3
Radiation : CuKα1	Filter: Non spécifié	0,9767	104,124	3	1	2
Wavelength : 1,54060	d-spacing	0,9655	105,846	2	3	2
SS/FOM : 57,2		0,9636	106,145	4	0	4
(0,0159;33)		0,9562	107,333	1	0	2
		0,9429	109,561	2	4	1
		0,9376	110,484	2	2	2

# الملاحق

الملحقات الخاصة لانعراج الأشعة السينية على العينة ع3 الكوارتز

**Pattern : PDF 82-0511    Radiation :1,54060    Quality: Hypothétique**

Formula : Si O2		d	2θ	I fix	h	k	L
Name : Silicon Oxide		4,21321	21,069	245	1	0	0
Name (minéral) : Quartz		3,3317	26,736	1000	1	0	1
Name		2,4325	36,923	68	1	1	0
Common		2,28605	39,383	82	0	1	2
		2,22081	40,59	44	1	1	1
		2,10661	42,896	58	2	0	0
		1,9646	46,169	27	0	2	1
Lattice : Hexagonal	Mol. Weight = 60,08	1,81364	50,267	89	1	1	2
S,G : P3121 (152)	Volume[CD] = 11,57	1,81364	50,267	89	0	0	3
	DX=	1,66585	55,085	59	2	0	2
		1,59244	57,858	2	2	1	0
a= 4,86500	alpha=	1,52838	60,53	70	2	1	1
b=	beta =	1,45434	63,964	19	1	1	3
c= 5,44300	gamma=	1,4044	66,527	2	3	0	0
a/b= 1,00000	Z = 6	1,37444	68,173	88	2	1	2
c/b= 1,11881		1,37444	68,173	88	0	2	3
		1,35987	69,006	42	3	0	1
ICSD Collection Code: 074529		1,29489	73,008	21	0	1	4
Hypothetical Structure: Structure calculated theoretically		1,24803	76,226	19	0	3	2
Remark From ICSD/CSD: REM F Origin shift of .3333 along c-axis.		1,21625	78,594	7	2	2	0
Test From ICSD: No R value given		1,19683	80,124	24	1	2	3
Test From ICSD: At least one TF missing		1,18756	80,878	20	2	2	1
Additional Pattern: See PDF 00-046-1045		1,18756	80,878	20	1	1	4
Article Title: Crystal-structure calculation with distorted ions		1,16854	82,478	23	3	1	0
Wyckoff Sequence: c a (P3121)		1,1425	84,788	7	3	1	1
ANX: AX3		1,1425	84,788	7	0	2	4
		1,11057	87,833	2	2	2	2
		1,11057	87,833	2	0	3	3
Structure							
Publication: Phys. Rev. B: Condens. Matter							
Détails: volume 48, page 2889 (1993)							
Auteurs: Lacks, D.J., Gordon, R.G.							
Référence primaire							
Publication: Calculated from ICSD using POWD-12++							
Radiation : CuKa1	Filter : Non spécifié						
Wavelength : 1,54060	d-spacing						
SS/FOM : 146,1							
(0,0054;29)							



## الملاحق

الملحق الخاص بقياسات المسامية ونسبة الإمتصاص والكتلة الحجمية والكثافة قبل وبعد دورات التجمد والذوبان للعينه 1ع

الكثافة Ps غ/سم <sup>3</sup>	الكتلة الحجمية Mv غ/سم <sup>3</sup>	نسبة الامتصاص AB %	المسامية % P	ma' ( mh) (غ)	الكتلة ma (غ) (msat )	الكتلة الجافة msec(غ)	رقم العينه	عدد الدورات	العينه المرجعية
2,58	2,42	2,54	6,16	226,30	379,00	369,60	2	2	1ع
2,73	2,67	0,81	2,17	241,60	384,40	381,30	7		
<b>2,65</b>	<b>2,55</b>	<b>1,68</b>	<b>4,16</b>	<b>233,95</b>	<b>381,70</b>	<b>375,45</b>	متوسط		
2,57	2,41	2,60	6,26	225,80	379,10	369,50	2	4	
2,54	2,48	0,92	2,33	234,50	384,50	381,00	7		
<b>2,55</b>	<b>2,44</b>	<b>1,76</b>	<b>4,30</b>	<b>230,15</b>	<b>381,80</b>	<b>375,25</b>	متوسط		
2,55	2,39	2,60	6,21	224,50	379,00	369,40	2	6	
2,61	2,55	0,94	2,41	235,00	384,60	381,00	7		
<b>2,58</b>	<b>2,47</b>	<b>1,77</b>	<b>4,31</b>	<b>229,75</b>	<b>381,80</b>	<b>375,20</b>	متوسط		
2,56	2,39	2,71	6,48	225,10	379,50	369,50	2	8	
2,61	2,54	1,00	2,54	234,90	384,60	380,80	7		
<b>2,58</b>	<b>2,47</b>	<b>1,85</b>	<b>4,51</b>	<b>230,00</b>	<b>382,05</b>	<b>375,15</b>	8		
2,65	2,47	2,63	6,50	229,90	379,20	369,50	2	10	
2,62	2,54	1,10	2,81	235,10	384,80	380,60	7	10	
<b>2,63</b>	<b>2,51</b>	<b>1,86</b>	<b>4,65</b>	<b>232,50</b>	<b>382,00</b>	<b>375,05</b>	متوسط		
2,62	2,45	2,65	6,51	228,70	379,30	369,50	2	12	
2,65	2,57	1,21	3,11	236,60	384,70	380,10	7		
<b>2,64</b>	<b>2,51</b>	<b>1,93</b>	<b>4,81</b>	<b>232,65</b>	<b>382,00</b>	<b>374,80</b>	متوسط		
2,65	2,48	2,68	6,64	229,90	378,90	369,00	2	14	
2,66	2,57	1,29	3,31	236,90	384,90	380,00	7		
<b>2,65</b>	<b>2,52</b>	<b>1,99</b>	<b>4,98</b>	<b>233,40</b>	<b>381,90</b>	<b>374,50</b>	متوسط		

## الملاحق

الملحق الخاص بقياسات المسامية ونسبة الإمتصاص والكتلة الحجمية والكثافة قبل وبعد دورات التجمد والذوبان للعينه ع2

الكثافة Ps غ/سم <sup>3</sup>	الكتلة الحجمية Mv غ/سم <sup>3</sup>	نسبة الامتصاص AB %	المسامية % P	ma' (mh) (غ)	الكتلة ma (غ) (msat )	الكتلة الجافة msec(غ)	رقم العينه	عدد الدورات	العينه المرجعية
2,63	2,61	0,28	0,73	199,70	322,80	321,90	1	2	ع2
2,58	2,51	1,21	3,04	232,60	384,00	379,40	10		
<b>2,61</b>	<b>2,56</b>	<b>0,75</b>	<b>1,88</b>	<b>353,40</b>	<b>350,65</b>	<b>350,65</b>	<b>2</b>		
2,60	2,58	0,31	0,80	197,90	322,60	321,60	1	4	
2,59	2,51	1,35	3,37	233,00	384,20	379,10	10		
<b>2,60</b>	<b>2,54</b>	<b>0,83</b>	<b>2,09</b>	<b>353,40</b>	<b>350,35</b>	<b>350,50</b>	متوسط		
2,60	2,58	0,31	0,80	198,00	322,80	321,80	1	6	
2,61	2,52	1,35	3,40	233,60	383,80	378,70	10		
<b>2,60</b>	<b>2,55</b>	<b>0,83</b>	<b>2,10</b>	<b>353,30</b>	<b>350,25</b>	<b>350,35</b>	متوسط		
2,60	2,58	0,31	0,80	198,00	322,80	321,80	1	8	
2,61	2,52	1,40	3,53	233,60	383,80	378,50	10		
<b>2,61</b>	<b>2,55</b>	<b>0,86</b>	<b>2,16</b>	<b>353,30</b>	<b>350,15</b>	<b>350,25</b>	متوسط		
2,60	2,57	0,31	0,80	198,00	323,10	322,10	1	10	
2,67	2,58	1,40	3,61	237,00	384,00	378,70	10		
<b>2,63</b>	<b>2,58</b>	<b>0,85</b>	<b>2,20</b>	<b>384,00</b>	<b>378,70</b>	<b>378,70</b>	متوسط		
2,60	2,57	0,31	0,80	198,00	323,10	322,10	1	12	
2,67	2,57	1,45	3,74	237,00	384,00	378,50	10		
<b>2,63</b>	<b>2,57</b>	<b>0,88</b>	<b>2,27</b>	<b>353,55</b>	<b>350,30</b>	<b>349,25</b>	متوسط		
2,69	2,65	0,59	1,57	201,70	322,90	321,00	1	14	
2,66	2,58	1,19	3,07	235,80	382,60	378,10	10		
<b>2,67</b>	<b>2,61</b>	<b>0,89</b>	<b>2,32</b>	<b>352,75</b>	<b>349,55</b>	<b>349,00</b>	متوسط		

## الملاحق

الملحق الخاص بقياسات المسامية ونسبة الإمتصاص والكتلة الحجمية والكثافة قبل وبعد دورات التجمد والذوبان للعيّنة ع<sub>3</sub>

الكثافة Ps غ/سم <sup>3</sup>	الكتلة الحجمية Mv غ/سم <sup>3</sup>	نسبة الامتصاص AB %	المسامية % P	ma' (mh) (غ)	الكتلة ma (غ) (m <sub>sat</sub> )	الكتلة الجافة m <sub>sec</sub> (غ)	رقم العيّنة	عدد الدورات	العيّنة المرجعية
2,16	1,83	8,27	15,13	90,10	182,00	168,10	2	2	ع <sub>3</sub>
2,02	1,48	18,30	27,01	44,50	104,10	88,00	6		
<b>2,09</b>	<b>1,65</b>	<b>13,28</b>	<b>21,07</b>	<b>67,30</b>	<b>143,05</b>	<b>128,05</b>	متوسط		
2,13	1,80	8,63	15,51	89,00	182,50	168,00	2	4	
1,95	1,43	18,66	<b>26,67</b>	42,80	104,30	87,90	<b>6</b>		
<b>2,04</b>	<b>1,61</b>	<b>13,64</b>	<b>21,09</b>	<b>86,50</b>	<b>185,60</b>	<b>168,00</b>	متوسط		
2,23	1,70	10,48	23,88	86,50	185,60	168,00	6	6	
1,97	1,40	20,46	28,71	42,80	104,80	87,00	<b>6</b>		
<b>2,10</b>	<b>1,55</b>	<b>15,57</b>	<b>26,29</b>	<b>87,60</b>	<b>182,90</b>	<b>163,00</b>	متوسط		
2,16	1,71	12,21	20,88	87,60	182,90	163,00	6	8	
2,15	1,48	21,03	31,12	46,50	105,30	87,00	<b>6</b>		
<b>2,16</b>	<b>1,59</b>	<b>16,62</b>	<b>26,00</b>	<b>67,05</b>	<b>144,10</b>	<b>125,00</b>	متوسط		
2,28	1,69	15,38	25,95	87,50	180,00	156,00	1	10	
2,08	1,41	22,64	32,01	44,50	105,10	85,70	<b>6</b>		
<b>2,18</b>	<b>1,55</b>	<b>17,96</b>	<b>28,98</b>	<b>66,00</b>	<b>142,55</b>	<b>120,85</b>	متوسط		
2,20	1,61	16,77	26,94	84,50	181,00	155,00	1	12	
2,00	1,37	23,01	31,47	42,70	105,30	85,60	6		
<b>2,10</b>	<b>1,49</b>	<b>19,99</b>	<b>29,21</b>	<b>63,60</b>	<b>143,15</b>	<b>120,30</b>	متوسط		
2,16	1,58	16,97	26,80	83,50	182,00	155,60	1	14	
2,05	1,38	23,51	32,52	43,80	105,60	85,50	6		
<b>2,10</b>	<b>1,48</b>	<b>20,24</b>	<b>29,66</b>	<b>63,65</b>	<b>143,80</b>	<b>120,55</b>	متوسط		

## الملاحق

ملحق رقم III : لوحة رقم 01: تبين الكتل الحجرية بالموقع التي تم قياس مؤشر صلابتها بجهاز السكيلرومتر ، وسرعة الموجة فوق الصوتية.

		
ح3 - الحمامات الكبرى	ح2- الحمامات الكبرى	ح1 الحمامات الكبرى
		
ح3 -قوس كركلا (الجهة الشمالية الجنوبية)	ح3 قوس كركلا (الجهة الغربية الجنوبية)	ح1 قوس كركلا (الجهة الشرقية الجنوبية)
		
ح3-الركن الجنوبي الشرقي معبد العائلة السيفرية	ح2 الركن الشمالي الغربي لمعبد العائلة السيفرية	ح1 -مدخل معبد السيفيري
		
ح3 المسرح	ح2 المسرح	ح1 المسرح

فهرس الصور

---

فهرس الصور

## فهرس الصور

- الصورة رقم 1: تبيّن الجدار الغربي للفوروم القديمة منجز بكتل حجرية مصقولة من نوع  
الحجارة الكلسية ذات الحبيبات الدّقيقة بتقنية النظام الكبير..... 88
- الصورة رقم 2: تبيّن كورنيشات منحوتة من الحجارة الجيرية البيوكلاست ذات اللون  
الرّمادي والحبيبات الناعمة تقع على جانبي معبد العائلة السّيفيرية..... 89
- الصورة رقم 3: تبيّن حجارة التّوف الكهفي المستخدمة كدبش في جدران الحمامات الكبرى  
الصورة رقم 4: حجارة التّوف الكهفي المستخدمة كدبش في قوس المدخل الشرقي  
للمعمودية..... 90
- الصورة رقم 5: الحجارة الكلسية ذات اللون الرمادي البيج الفاتح موجودة على شكل أعمدة  
في بازيليك كروسكنيوس (الحي المسيحي) ..... 91
- الصورة رقم 6: تبيّن أعمدة منجزة من التّرافونتين ذو اللون المّعزّة المّحمّر على مستوى  
بازيليك كروسكنيوس (الحي المسيحي) ..... 92
- الصورة رقم 7: تبيّن صفائح الرّخام من نوع الألباستر بيرسيلا المستخدمة في تزيين جدران  
إحدى قاعات الحمامات الكبرى..... 94
- الصورة رقم 8: بقايا صفائح رخام gréco scritto في caldarium بقاعة بالحمامات  
الكبرى..... 96
- الصورة رقم 9: أعمدة رخامية من نوع gréco scritto بمعبد فينوس..... 96
- الصورة رقم 10: تبيّن تغطية جدران بالحجر الكلسي ذو اللون الأصفر الوردى في إحدى  
قاعات الحمامات الكبرى..... 97
- الصورة رقم 11: تبيّن تقنية البناء الإفريقية في جدران الحمامات الكبرى ..... 103
- الصورة رقم 12: تبيّن تقنية البناء الإفريقية في جدران المعمودية بالحي المسيحي..... 103
- الصورة رقم 13: تبيّن جدار منجز بتقنية النّظام الكبير على مستوى الكابيتول..... 104
- الصورة رقم 14: تقنية السّنبله المستخدمة في انجاز تبليط أرضيات سوق الإخوة  
كوزينوس..... 105
- الصورة رقم 15: قوس بالحمامات الكبرى منجز بالتّقنية القائمة على الأجر..... 105
- الصورة رقم 16: الجدران الخارجية للمعمودية منجزة بالتّقنية القائمة على الأجر..... 105



## فهرس الصور

- الصورة رقم 17: تبين استخدام أكثر من مادة (الكتل الحجرية مصقولة مع الدبش والأجر) في إحدى جدران قاعات الحمامات الكبرى..... 106
- الصورة رقم 18: تبين استخدام أكثر من تقنية بناء (تقنية البناء بالنظام الكبير، التقنية المختلطة) في إحدى جدران الحمامات الكبرى..... 106
- الصورة رقم 19: تبين استخدام أكثر من مادة (الكتل الحجرية مع الدبش والأجر) في الجدار الغربي لمعبد فينوس جينتركس..... 106
- الصورة رقم 20: تبين جدار منجز بتقنية البناء المختلطة (التقنية الإفريقية مع الأجر) في مبنى معبد فينوس جينيتريكس..... 106
- الصورة رقم 21: تبين تشقق الحجارة على مستوى العروق في قاعدة قوس كركلا ..... 112
- الصورة رقم 22: توضح تشقق الحجارة تحت تأثير الأحمال في أحد جدران المسرح..... 115
- الصورة رقم 23: توضح تشقق الحجارة تحت تأثير الأحمال على مستوى جدران قوس كركلا..... 115
- الصورة رقم 24: تبين تراكم الثلوج على هياكل البناء في الموقع الأثري ديسمبر 2018.... 125
- الصورة رقم 25 : تبين عملية ذوبان الثلوج والجليد وتشكل برك مائية في الموقع الأثري ديسمبر 2019..... 125
- الصورة رقم 26: توضح ميلان إحدى جدران الحمامات الكبرى بسبب الأمطار..... 126
- الصورة رقم 27: توضح تدهم أحد جدران الحمامات الكبرى تحت تأثير مياه الأمطار..... 126
- الصورة رقم 28: توضح تساقط مياه الأمطار من الجهة الغربية للأعمدة بالكنيسة..... 126
- الصورة رقم 29: توضح تجمع الأوحال بفعل الأمطار بالمدخل الجنوبي للموقع الأثري..... 126
- الصورة رقم 30: تبين صعود الماء بالخاصية الشعرية بجدار الحمامات الكبرى..... 127
- الصورة رقم 31: تبين صعود الماء بالخاصية الشعرية في معبد العائلة السيفيرية..... 127
- الصورة رقم 32: تبين نمو بعض النباتات على جدران المعمودية..... 135
- الصورة رقم 33: توضح نمو الشجيرات وإحداث شروخ على جدران الحمامات الكبرى..... 135
- الصورة رقم 34: تبين مخلفات طيور الحمام على مستوى جدران الحمامات الكبرى..... 136
- الصورة رقم 35: تبين انتشار النمل الأسود على مستوى معبد جنيتريكس..... 137

## فهرس الصور

- الصورة رقم 36: توضح وجود خلية الدبور داخل فجوات إحدى جدران الحمامات الكبرى..... 137
- الصورة رقم 37: توضح وجود ديدان بيضاء داخل شقوق أعمدة بالكنيسة القديمة..... 137
- الصورة رقم 38: تبيّن انتشار أشنات بيضاء على مستوى قوس كركلا..... 141
- الصورة رقم 39: تبيّن انتشار أشنات برتقالية اللون على كتلة حجرية على مستوى الحي المسيحي..... 141
- الصورة رقم 40: تبيّن نمو الطحالب الخضراء على جدران وأسقف إحدى قاعات الحمامات الكبرى..... 143
- الصورة رقم 41: تبيّن نمو الطحالب الخضراء في إحدى أقبية الحمامات الكبرى..... 143
- الصورة رقم 42: تبيّن مظاهر الحرق على مستوى جدران الطابق تحت الأرضي للحمامات الكبرى..... 145
- الصورة رقم 43: تبيّن مظهر الحرق على مستوى الموقع الأثري بقرب الحمامات الكبرى..... 145
- الصورة رقم 44: تبيّن تعدي الزوار بالكتابة في أقبية الحمامات الكبرى..... 146
- الصورة رقم 45: تبيّن تعدي الزوار بالرسومات والحفر والنقش على أحد جدران الحمامات الكبرى..... 146
- الصورة رقم 46: تبيّن تعدي الزوار بالصعود على الكتل الحجرية على مستوى المسرح..... 147
- الصورة رقم 47: تبيّن تعدي الزوار بالصعود على هيكل قوس كركلا..... 147
- الصورة رقم 48: تبيّن عيوب التّدخلات الخاطئة على مستوى الكابيتول (غياب حجارة مفتاح القوس وإنجاز جدار لدعم القوس)..... 149
- الصورة رقم 49: تبيّن تركيب الكتل الحجرية بطريقة عشوائية في الجدار الشرقي على مستوى بازيليك جوليا..... 150
- الصورة رقم 50: توضح استخدام الإسمنت والأسلاك المعدنية في ترميم وتدعيم إلى عمود متواجد مبنى بيت الأسقف والكاهن (المخطط رقم 1)..... 150

## فهرس الصور

- الصورة رقم 51: توضع استخدام الإسمنت والقضبان المعدنية على مستوى الجدار  
الفاصل بين الكابتول وسوق الإخوة كوزينوس (المخطط رقم 1)..... 151
- الصورة رقم 52: التّشوه البصري مع ظهور تشققات على مستوى النّافورة المخروطية..... 152
- الصورة رقم 53: توضح تدهور الحجارة بشكل عمودي للأحمال
- للمداميك السفلى على مستوى مدخل المعبد السّيفيري (الجهة الشّمالية)..... 153
- الصورة رقم 54: تبيّن احتواء كتلة حجرية مصقولة على أخايد على مستوى الحي  
المسيحي..... 154
- الصورة رقم 55: تبيّن تشكل أخايد على الحجر على مستوى جدار بالحمامات الكبرى... 154
- الصورة رقم 56: تبيّن تشقق وتشرخ حجارة قاعدة قوس كركلا بشكل مائل 45° ..... 155
- الصورة رقم 57: تبيّن تشقق حجارة على المداميك السفلى لجدار المعبد السّيفيري..... 155
- الصورة رقم 58: تبيّن تشقق وتشرخ الكتل الحجرية لجدار بالحمامات الكبرى..... 156
- الصورة رقم 59: تبيّن تشقق وتشرخ الكتل الحجرية على مستوى جدران البازيليكا المدنية  
القرن IV م..... 156
- الصورة رقم 60: تبيّن انفصام في عمود بشكل أفقي إلى عدة أجزاء على مستوى بازيليك  
كروسكنيوس بالحي المسيحي..... 156
- الصورة رقم 61: تبيّن ظاهرة الانفصال المتوازي للحجارة في جدار بالحمامات الكبرى.... 157
- الصورة رقم 62: تبيّن تشظي الكتل الحجرية على مستوى جدار بالمرح..... 158
- الصورة رقم 63: تبيّن تشظي الكتل الحجرية على مستوى جدار قوس كركلا..... 158
- الصورة رقم 64: توضح عملية تشكل قنوات في حجارة التّوف بمدخل المعمودية..... 159
- الصورة رقم 65: تبيّن ثقب ناتجة بفعل بشري على أحد جدران الحمامات الكبرى..... 156
- الصورة رقم 66: تبيّن تشكل ثقب في إحدى حجارة على مستوى الحي المسيحي..... 156
- الصورة رقم 67: تبيّن انفصال سطح الحجارة الكلسية على شكل أوراق على مستوى جدار  
معبد العائلة السّيفيرية..... 160

## فهرس الصور

- 160 الصورة رقم 68: تبين انفصال سطح لكتلة حجرية على شكل أوراق على مستوى الحي المسيحي مبنى(38) (المخطط رقم 1).....
- 161 الصورة رقم 69: تبين تقشر الحجارة الكلسية على مستوى قاعدة قوس كركلا الشمالية الغربية.....
- 1162 الصورة رقم 70: تبين تبقع نتيجة صدأ المكونات المعدنية على جدار بالحمامات الكبرى..
- 163 الصورة رقم 71: طفح ملحي على حجر التّوف الكهفي في السّقف والجدران الداخلية المعمودية.....
- 164 الصورة رقم 72: تبين تدهور الباتينة للحجارة على مستوى جدار معبد العائلة السّيفيرية...
- 165 الصورة رقم 73: تلوث جدران وأسقف على مستوى الحمامات الكبرى باللون الأخضر نتيجة نمو الطحالب.....
- 164 الصورة رقم 74: توضح ظاهرة تشكل بقع سوداء على مستوى قوس كركلا.....
- 166 الصورة رقم 75: تبين تشكل قشور على نصب تذكاري متواجد على مستوى حديقة الموقع الأثري.....
- 196 الصورة رقم 76: صور مجهرية تبين تشكل الشقوق في البنية الداخلية للحجارة.....
- 197 الصورة رقم 77: تقشر الحجارة المداميك العلوية للمسرح بفعل الجليد.....
- 197 الصورة رقم 78: تقشر الحجارة للمعبد السّيفيري بفعل دورات التجمد والذوبان.....
- 11898 الصورة رقم 79: تبين التّشقق والانفصال والتجزؤ بفعل دورات التّجمد والذّوبان بكنيسة نوتردام دي لور بفرنسا.....
- 198 الصورة رقم 80: تبين تشق وانفصال بفعل الجليد بقاعدة قوس كركلا.....
- 199 الصورة رقم 81: تبين انتشار الشقوق بعمود بفعل الجليد بالحمامات الملحقة بالمعمودية...
- 199 الصورة رقم 82: تشقق كتل حجرية بمبنى بالحي الوثني.....
- 221 الصورة رقم 83 تبين محجر جبل جميلة الذي جلبت منه العيّنة ع1.....
- 221 الصورة رقم 84: تبين آثار إستخراج قديم محجر جبل جميلة.....
- 221 الصورة رقم 85: تبين مقلع جبل سيدي سعدون جلبت منه العيّنة ع2.....
- 221 الصورة رقم 86: تبين أجزاء من كتل حجرية وعناصر معمارية بموقع سيدي سعدون.....

## فهرس الصور

- 221 الصورة رقم 87: تبيّن آثار استخراج الحجارة من موقع سيدي سعدون.....
- 222 الصورة رقم 88: تبيّن مقلع حجارة التّوف الكهفي بواد الزّتين الدّهامشة جلبت منه العينة  
.....3ع
- 222 الصورة رقم 89: تبيّن عملية تحضير العينات بشكل مكعب.....
- الصورة رقم 90: تبيّن عملية تحضير العينات الأسطوانية (أ-آلة حفر العينات، ب-آلة  
تقطيع العينات).....
- 223 الصورة رقم 91: عينات الحجارة الأسطوانية المحضرة.....
- 224 الصورة رقم 92: عينة من الحجر الكلسي البني الصلب(ع1).....
- 224 الصورة رقم 93: عينة من حجارة البيوكلاست الرمادي ذو الحبيبات الناعمة(ع2).....
- 225 الصورة رقم 94: عينة من التّوف البركاني تحتوي فتحات وتجاويف بالعينات(ع3).....
- 226 الصورة رقم 95: تبيّن جهاز فلورة الأشعة السينية Primus II Rigaku «ZSX».....
- 228 الصورة رقم 96: تبيّن جهاز حيود الأشعة السينية Diffractometre d8 advance.....
- 234 الصورة رقم 97: تبيّن جهاز قياس سرعة الموجة فوق الصّوتية.....
- الصورة رقم 98: تبيّن الجهاز المستخدم في قياس مقاومة الضغط من نوع  
CONTROLAB.....
- 238 الصورة رقم 99: تبيّن جهاز قياس مؤشر الصلابة بجهاز سكيلرومتر.....
- 241 الصورة رقم 100: تبيّن عينات الإختبار المحضرة لدورات التّجميد والدّوبان.....
- 241 الصورة رقم 101: تبيّن غرفة التّجمد والدّوبان.....
- الصورة رقم 102: صور تبيّن عملية قياس الضّغط أحادي المحور على عينة التّوف  
الكهفي.....
- 255 الصورة رقم 103: تبيّن طريقة قياس مقاومة الضّغط للحجارة بجهاز السكيلرومتر.....
- 257 الصورة رقم 104: تبيّن الضرر البصري للعينة ع1 بعد التّعرض لدورات التّجمد  
والدّوبان.....
- 263 الصورة رقم 105: تبيّن الضّرر البصري للعينة ع2 بعد التّعرض لدورات التّجمد  
والدّوبان.....
- 263

## فهرس الصور

- الصورة رقم 106: تبين الضرر البصري للعيّنة ع3 بعد التّعرض لدورات التّجمد والذّوبان..... 264
- الصورة رقم 107: تبين المادة الطاردة للماء من نوع .....Alpa polyflui®..... 289
- الصورة رقم 108: تبين سطح حجارة قبل وبعد المعالجة بمادة طاردة للماء (أ: قبل العلاج، ب بعد العلاج)..... 289
- الصورة رقم 109: تبين تركيب محطة مناخية مصغرة على جدار منجز من الحجارة أ: Mini station VAISALA، ب: منظر خارجي لتركيب الجهاز، ج: منظر لتركيب مستشعرات الحرارة داخل الحجر..... 290
- الصورة رقم 110: تبين جهاز إنذار وقوع الجليد Alarme-Gel GSM - Radio et RTC من نوع THERMOKI-106-GSM..... 291
- الصورة رقم 111: برج مضاد للرياح متنقل..... 293
- الصورة رقم 112: صورة لجهاز استخراج الهواء البارد..... 294
- الصورة رقم 113: تبين ذوبان الثلج والجليد على سقف نتيجة تثبيت كابل التّسخين..... 296
- الصورة رقم 114: مكونات كابل التّدفئة أو التّسخين..... 299



فهرس الخرائط والمخططات

---

فهرس الخرائط والمخططات

# فهرس الخرائط والمخططات

---

## فهرس الخرائط

- الخريطة رقم 1: تبيّن الموقع الجغرافي لموقع جميلة..... 23
- الخريطة رقم 2: تبيّن الموقع الأثري لجميلة..... 24
- الخريطة رقم 3: تبيّن تضاريس منطقة جميلة..... 26
- الخريطة رقم 4: تبيّن البيئة الجيولوجية لولاية سطيف (منطقة جميلة) ..... 28
- الخريطة رقم 5: تبيّن توزيع الأمطار لولاية سطيف (منطقة جميلة) ..... 29
- الخريطة رقم 6: تبيّن موقع المحاجر التي جلبت منها العينات الحجرية..... 222

## فهرس المخططات

- مخطط رقم 1: المدينة الأثرية لجميلة (Cuicul)..... 48

# فهرس الأشكال

## فهرس الأشكال

- الشكل رقم 1: يوضح معدلات كمية الأمطار المتساقطة لمنطقة جميلة للفترة الممتدة من 1996 – 2008..... 31
- الشكل رقم 2: يوضح معدل سرعة الرياح في منطقة جميلة خلال سنوات من 1996 – 2008..... 34
- الشكل رقم 3: يوضح معدل درجات الحرارة الدنيا والمتوسطة والقصى السنوية لجميلة خلال الفترة الممتدة من 1996 – 2008..... 36
- الشكل رقم 4: يوضح تطور نسبة الرطوبة النسبية القصوى والدنيا لمنطقة جميلة خلال الفترة الممتدة من 1996 إلى 2008 ..... 37
- الشكل رقم 5: أعمدة بيانية تمثل عدد أيام تساقط الجليد لمنطقة جميلة خلال السنوات الممتدة من 1996 إلى 2008..... 40
- الشكل رقم 6: أعمدة بيانية تمثل تساقط الثلوج السنوي لمنطقة جميلة خلال السنوات الممتدة من 1996 – 2008..... 41
- الشكل رقم 7: يبين تصنيف الصخور النارية على أساس التركيب المعدني والتسيج واللون.. 65
- الشكل رقم 8: يبين العوامل المؤثرة على تحول الصخور المتحولة..... 69
- الشكل رقم 9: يبين أصل أهم الصخور المتحولة ومميزتها..... 75
- الشكل رقم 10: تمثيل بياني يوضح طرق تكوين الصخور الرسوبية..... 76
- الشكل رقم 11: التأثير المترامن لدرجة الحرارة والرطوبة في تلف الحجارة..... 118
- الشكل رقم 12: طريقة تكوين السلفين sulfon على الحجر الجيري..... 133
- الشكل رقم 13: تمثيل بياني لعملية التجوف..... 159
- الشكل رقم 14: تمثيل بياني لعملية التّقشر..... 162
- الشكل رقم 15: تمثيل بياني لتكوين الوسط المسامي (جسم صلب وفضاء المسام)..... 169
- الشكل رقم 16: آليات محاصرة الهواء في المسام (أ: احتجاز بالإلتفاف par dérivation، ب: احتجاز بصعوبة مرتبط بخشونة السطح (par la rugosité)..... 172
- الشكل رقم 17: حجم المياه في درجات حرارة مختلفة..... 173
- الشكل رقم 18: تمثيل تخطيطي (أ: لجزء الماء، ب: لبنية بلورة الجليد)..... 175

## فهرس الأشكال

- الشكل رقم 19: (أ)-تجمع عناصر جزيئات الماء داخل الجليد، ب-تغيير موضع الروابط التساهمية والهيدروجينية (O-H --- O ↔ O --- H-O)..... 176
- الشكل رقم 20: تمثيل لبنية الجليد..... 176
- الشكل رقم 21: تنظيم جزيئات الماء وفقًا لحالات الماء المختلفة..... 177
- الشكل رقم 22: تمثيل بياني لمختلف أطوار الجليد..... 178
- الشكل رقم 23: (أ) رسم تخطيطي لتوزيع الأشكال المختلفة للمياه غير المتجمدة في الوسط المسامي أثناء التجمد: ماء الشعيرية، المياه الممتازة ومياه البخار متوازنة حسب درجة الحرارة (الأسهم المتقطعة) ، الرطوبة النسبية والضغوط التي يطبقها الجليد على الوسط ؛ (ب) رسم تخطيطي لدرجات حرارة التجمد المقابلة (Tc)..... 180
- الشكل رقم 24: تمثيل تخطيطي لعمليات تشكيل الجليد المتحرك والإشعاعي..... 183
- الشكل رقم 25: تمثيل بياني لهبوب الرياح في المنحدر..... 184
- الشكل رقم 26: تجمد السائل الفراغي Interstitial..... 185
- الشكل رقم 27: مخطط أطوار الماء..... 186
- الشكل رقم 28: تمثيل تخطيطي لنموذج الضغوط الشعيرية في نظام مفتوح، هجرة المياه الشعيرية من خزان (أ) إلى خزان (ب) حيث تتجمد..... 189
- الشكل رقم 29: تمثيل تخطيطي لنموذج الضغط الشعيري في نظام مغلق، تمدد الجليد في الشعيرية من الخزان (ب) نحو الخزان (أ)..... 190
- الشكل رقم 30: يوضح اراحل اختراق الجليد في الشعيرية وفق نظرية الضغوط الشعيرية..... 191
- الشكل رقم 31: يوضح عملية نمو الجليد داخل المسام، أ: طرد الماء من شبكة المسام، ب: تشكل شريط الماء غير متجمد موجود بين الحجر والجليد يخلق ظاهرة الإمتصاص، واتجاه هجرة المياه غير المتجمدة تكون عكسية من الدخول نحو الخارج..... 192
- الشكل رقم 32: يبين التدهور الذي يحدث على مستوى مسام الحجارة بفعل الضغط الهيدروليكي: 1- الماء بكميات كبيرة في المسام الكلية، 2- المياه المجمدة في المسام الكلية المفتوحة، 3- انغلاق كلي للمسام التي تضررت بالمياه المجمدة..... 193

## فهرس الأشكال

- الشكل رقم 33: يبين تدهور المسام في الصخور عن طريق الضغط الأسموزي (VP1، VP2، VP3 ، ضغط بخار الماء الممتص والماء بكميات كبيرة و الجليد، 194
- 1 - التدفق الأسموزي للمياه من المسام الكبيرة للمسام الدقيقة في درجة حرارة  $T < 0^\circ\text{C}$
- 2 - التدفق الأسموزي للمياه الممتصة من المسام الكبيرة للمسام الدقيقة مع الجليد في  $T > 0^\circ\text{C}$
- 3-الصخور المتدهورة بسبب الضَّغط الأسموزي (أ) اتجاه حركة جزيء الماء، (ب) اتجاه الضَّغط).....
- الشكل رقم 34: يبين انتشار الشقوق داخل البنية المجهرية للحجر (أ-تشققات بين الحبيبات، ب: تشققات على مستوى مصفوفة الحجر، ج: تشققات على مستوى الحبيبات) 196
- الشكل رقم 35: تنوي بلورات الجليد: (أ) تنوي متجانس، (ب) تنوي غير متجانس، (ج) تنوي متجانس في حالة وجود عيوب..... 203
- الشكل رقم 36: تمثيل توضحي يبين المراحل المختلفة لتشبع المسامات بالماء..... 208
- الشكل رقم 37: يبين مقتطفات من تجارب Hirschwald 1908 التي تبين ضرر الجليد؛ أ - يبين تأثير المسام المتصلة بالشعرية، ب- يظهر الجليد المتشكل مقذوف على السطح من خلال الفتحات..... 209
- الشكل رقم 38: تحديد مقاومة الجليد انطلاقاً من درجة التشبع الحرج المحدد (أ - مادتين لها نفس التشبع في وقت التجمد  $S_{Acrt}$  لكن مقاومتها للجليد مختلفة وفق درجة (  $S_{Cr}$  )، ب - مادتين لها نفس التشبع الحرج  $S_{Cr}$  لكن سلوك مختلف للجليد وفق درجة تشبعها في وقت التجمد..... 210
- الشكل رقم 39: يبين التفاعل بين مختلف العوامل المؤثرة في تجمد الحجارة..... 211
- الشكل رقم 40: درجة حرارة التجمد بدلالة قطر المسام..... 212
- الشكل رقم 41: رسم تخطيطي لمبدأ حيود الأشعة السينية على المستويات البلورية..... 227
- الشكل رقم 42: تمثيل بياني لإجراء قياس مسامية 48 ساعة (N48) (أ-مستوى الماء  $H/4 \downarrow 1$  سا، ب منسوب H لمدة 24 ساعة، مع H ارتفاع العينة)..... 232
- الشكل رقم 43: يبين أسلوب قياس سرعة الموجة  $V_p$  على العينات (أ-طريقة القياس المباشرة، ب-طريقة القياس نصف المباشرة، ج-طريقة القياس غير مباشرة)..... 235



## فهرس الأشكال

- الشكل رقم 44: يبين مقطع طولي لجهاز السكيلرومتر ..... 239
- الشكل رقم 45: يبين مبدأ عمل جهاز السكيلرومتر ..... 240
- الشكل رقم 46: يوضح مخطط الدورة النظرية للتجميد والذوبان ..... 241
- الشكل رقم 47: رسم تخطيطي لبروتوكول الدراسة التجريبية ..... 242
- الشكل رقم 48: رسم بياني لمخططات حيود الأشعة السينية للعيّنة ع1 ..... 243
- الشكل رقم 49: رسم بياني لمخططات حيود الأشعة السينية للعيّنة ع2 ..... 244
- الشكل رقم 50: رسم بياني لمخططات حيود الأشعة السينية للعيّنة ع3 ..... 244
- الشكل رقم 51: بين التغير في كتلة العينات بدلالة دورات التّجمد والذّوبان ..... 265
- الشكل رقم 52: يبين تطور الكثافة للعينات بدلالة دورات التّجمد والذّوبان ..... 267
- الشكل رقم 53: يبين تطور المسامية خلال دورات التّجمد والذّوبان ..... 268
- الشكل رقم 54: منحني تطور امتصاص الماء للعينات بدلالة دورات التّجمد والذّوبان ... 270
- الشكل رقم 55: يبين نتائج اختبارات مقاومة الضّغط أحادي المحور بعد دورات التّجمد والذّوبان ..... 274
- الشكل رقم 56: يبين برج ثابت مضاد للجليد ..... 293
- الشكل رقم 57: تمثيل بياني لعمل نظام sis في الغلاف الجوي ..... 294
- الشكل رقم 58: رسم تخطيطي يظهر تأثير طاقة التّدفئة على درجة الحرارة ضمن طبقات الغلاف الجوي ..... 295
- الشكل رقم 59: يبين نظام مكافحة التّجمد ..... 297

فهرس الجداول

---

فهرس الجداول

## فهرس الجداول

الجدول رقم 1: يبين التساقط السنوي للأمطار بالمليتر لمنطقة جميلة للفترة الممتدة 1996 إلى 2008.....	30
الجدول رقم 2: يبين المعدلات الشهرية والسنوية لسرعة الرياح (م/ثا) لمنطقة جميلة للفترة الممتدة من 1996 - 2008.....	33
الجدول رقم 3: بين المتوسطات الشهرية والسنوية لدرجة الحرارة القصوى والدنيا (م°) لمنطقة جميلة خلال الفترة الممتدة من 1996 إلى 2008.....	35-36
الجدول رقم 4: المعدلات الشهرية والسنوية للرطوبة النسبية (%) لمنطقة جميلة للسنوات الممتدة من 1996-2008 .....	38
الجدول رقم 5: يبين أيام تساقط الجليد خلال الأشهر لمنطقة جميلة للفترة الممتدة 1996 من إلى 2008.....	39
الجدول رقم 6: يبين التساقط الشهري للثلوج لمنطقة جميلة خلال الفترة الممتدة من 1996 إلى 2008.....	42
الجدول رقم 7: يبين أهم أنواع أنسجة الصخور النارية مميزاتها.....	67
الجدول رقم 8: أهم أنواع الحجارة الكلسية المستخدمة في الموقع وفق حجم استخدامها... .	87
الجدول رقم 9: يبين مصدر أهم أنواع حجارة البناء المستخدمة وطبيعة الاستخدام .....	99
الجدول رقم 10: يبين أهم أنواع الحجارة التزيينية المستخدمة في الموقع الأثري لجميلة ومصدرها وطبيعة إستخدامها.....	101
الجدول رقم 11: يوضح توزيع تقريبي لسرعة الرياح وتأثيراتها.....	117
الجدول رقم 12: يبين الأنواع الرئيسية للأملاح التي تلعب دور في تلف الحجارة الأثرية.....	129
الجدول رقم 13: يبين الحجم النوعي للماء والجليد محسوبين انطلاقا من كثافة ومعامل التوسع الحراري للجليد.....	174
الجدول رقم 14: يبين الخصائص الميكانيكية للجليد عند درجة حرارة 0 و -5م°.....	174
الجدول رقم 15 : يبين أهم الدراسات المخبرية المتعلقة بتأثير الجليد وأهدافها.....	214
الجدول رقم 16: نتائج التحليل الكيميائي لعينات من الحجارة.....	242

## فهرس الجداول

- الجدول رقم 17: ملخص نتائج التحليل بتقنية حيود الأشعة السينية للعينات..... 245
- الجدول رقم 18: نتائج قياس كثافة للعينات قبل دورات التجمد والذوبان..... 247
- الجدول رقم 19: نتائج قياس المسامية الكلية للعينات قبل دورات التجمد والذوبان..... 248
- الجدول رقم 20: نتائج اختبار امتصاص الماء للعينات قبل دورات التجمد والذوبان.... 248
- الجدول رقم 21: نتائج قياس سرعة الموجات الصوتية الأولية للعينات الحجرية..... 250
- الجدول رقم 22: نتائج حساب مؤشر الإستمرارية ونسب مسامية المسام ومسامية الشقوق. 252
- الجدول رقم 23: نتائج قياس سرعة الموجات الصوتية الأولية للعينات الحجرية..... 253
- الجدول رقم 24: ملخص نتائج قياس مقاومة الضغظ أحادي المحور..... 254
- الجدول رقم 25: نتائج قياس مقاومة الضغظ بجهاز السكيليرومتر على حجارة الموقع.... 256
- الجدول رقم 26: يبين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للعينات في الحالة السليمة..... 258
- الجدول رقم 27: المقياس البصري لتقييم تأثير دورات التجمد والذوبان على الحجارة..... 263
- الجدول رقم 28: يبين نسبة التغير في وزن العينات قبل وبعد دورات التجمد والذوبان..... 266
- الجدول رقم 29: يبين كثافة العينات قبل وبعد دورات التجمد والذوبان..... 268
- الجدول رقم 30: يبين نسبة التغيرات في المسامية للعينات قبل وبعد دورات التجمد والذوبان..... 269
- الجدول رقم 31: نسبة تطور امتصاص العينات للماء قبل وبعد دورات التجمد والذوبان 271
- الجدول رقم 32: سرعة الموجة فوق الصوتية قبل وبعد دورات التجمد والذوبان..... 272
- الجدول رقم 33: نتائج حساب مؤشر الإستمرارية ومسامية المسام والشقوق بعد دورات التجمد والذوبان..... 272
- الجدول رقم 34: الجدول رقم 36: مقارنة مؤشر الإستمرارية ومختلف أنواع المسامية قبل وبعد دورات التجمد والذوبان [ق- قبل التجمد، ب بعد التجمد، (+) بالزيادة، (-) بالنقصان]] 273
- الجدول رقم 35: نتائج اختبار مقاومة الضغظ قبل وبعد دورات التجمد والذوبان..... 275
- الجدول رقم 36: ملخص التغير في الخصائص الفيزيائية والميكانيكية قبل وبعد دورات التجمد والذوبان [ (+) بالزيادة، (-) بالنقصان ]..... 278
- الجدول رقم 37: تطور الخواص الفيزيائية والميكانيكية للحجارة بعد دورات التجميد..... 281

# الفهرس العام

## الفهرس العام

قائمة المختصرات

قائمة المصطلحات

المقدمة

21	الفصل الأول: الإطار الجغرافي والتاريخي
22	I- الإطار الجغرافي والمناخي
22	I-1- الإطار الجغرافي
22	I-1-1- الموقع الجغرافي
24	I-1-2- تضاريس المنطقة
27	I-1-3- الشبكة المائية
27	I-1-4- البنية الجيولوجية
28	I-2- المناخ
29	I-2-1- تساقط الأمطار
23	I-2-2- الرياح
34	I-2-3- الحرارة
63	I-2-4- الرطوبة
39	I-2-5- الجليد
40	I-2-6- تساقط الثلوج
42	II- الإطار التاريخي
44	II-1- لمحة تاريخية عن المدينة
45	II-2- أهم معالم الموقع الأثري
48	II-2-1- المدينة القديمة
48	II-2-1-1- الكاردوا مكسيموس
48	II-2-1-2- الفوروم القديمة
48	II-2-1-3- مجلس العشيـرة





## الفهرس العام

- 58 2-I- أنواع الصخور
- 59 1-2-I- الصخور النارية
- 59 1-1-2-I- أنواع الصّخور النَّارية
- 59 أ- تصنيف الصّخور وفق أماكن تشكلها
- 60 - صخور النَّارية الدّاخلية (الجوفية)
- 60 - الصّخور النارية السّطحية او الإندفاعية (البركانية)
- 61 ب- تصنيف الصّخور على حسب التّركيب المعدني ( محتوى السليكا)
- 61 -صخور نارية حامضية (حمضية)
- 61 - صخور نارية وسيطة (معتدلة)
- 61 - الصّخور النَّارية القاعدية (قلوية)
- 62 - الصّخور فوق القاعدية
- 62 2-1-2-I- التكوين المعدني للصّخور النَّارية
- 63 3-1-2-I- خصائص الصّخور النَّارية
- 63 4-1-2-I- ألوان الصّخور النَّارية
- 63 أ-صخور نارية فاتحة اللّون
- 64 ب-صخور نارية قاتمة اللّون
- 64 ج-صخور نارية متوسطة اللّون
- 64 4-1-2-I- نسيج الصّخور النارية
- 64 1-4-1-2-I-العوامل المؤثرة في أنسجة الصّخور النَّارية
- 64 أ-معدّل تبريد الصّهارة
- 64 ب-كمية السيليكا الموجودة
- 65 ج-كمية الغازات الذائبة في الصّهارة
- 65 2-4-1-2-I- أنواع أنسجة الصّخور النَّارية
- 67 2-2-I- الصّخور المتحولة
- 68 1-2-2-I- العوامل المؤثر على تحول الصّخور المتحولة

## الفهرس العام

- 68 أ-عامل الحرارة
- 68 ب-عامل الضَّغَط
- 69 ج-المحاليل أو السَّوائل الكيمياءية
- 69 د-الزمن
- 70 I-2-2-2-أنواع التَّحول
- 70 أ-التحول التماسي أو التَّحول الحراري
- 70 ب-التَّحول الحرماي
- 71 ج-التَّحول في مناطق الدفن والظمر
- 71 د-التَّحول الإقليمي أو التَّحول الميكانيكي
- 72 I-2-2-3-التكوين المعدني للصَّخور المتحولة
- 73 I-2-2-4- نسيج الصَّخور المتحول
- 73 أ-النَّسيج الدَّقيق جدا
- 73 ب-النَّسيج الحبيبي
- 73 ج-النَّسيج البورفييري
- 73 د-النَّسيج التَّورقي
- 74 I-2-2-5- خصائص الصَّخور المتحولة
- 75 I-2-3- الصَّخور الرَّسوبية
- 77 I-2-3-1- أنواع الصَّخور الرَّسوبية
- 77 أ-الصَّخور الرَّسوبية الحصوية أو الفتاتية (ميكانيكية النَّشأة)
- 77 - صخور رسوبية ذات حبيبات معدنية مستديرة (الجمودية)
- 77 - صخور رسوبية رملية جيرية
- 78 - صخور رسوبية طينية
- 78 ب-الصَّخور الرَّسوبية الكيمياءية
- 78 - الصَّخور الكربوناتية
- 79 -الصَّخور السَّيليكية أو السَّليسية

## الفهرس العام

80	- المتبخرات
80	ج - صخور رسوبية عضوية النشأة
81	I-2-3-2 - مميزات الصّخور الرسوبية
81	I-3-3 - أهم الخواص الحجاره
81	I-3-1-1 - التركيب المعدني
82	I-3-2-2 - النسيج
82	I-3-3-3 - الكثافة والنقل النوعي
83	I-3-4-4 - النفاذية والخاصية الشعريه
83	I-3-5-5 - المسامية
83	I-3-6-6 - الصلابة
84	I-3-7-7 - المواد الرابطة
84	I-3-8-8 - مقاومة التحمل الميكانيكي
84	I-3-9-9 - التركيب الطبقي للحجاره
85	I-3-10-10 - التمدد الحراري لمعادن الصّخور
85	I-3-11-11 - التوصيل الحراري
86	II - مواد البناء الحجرية للموقع الأثري
86	II 1-1 - حجاره البناء
87	II 1-1-1 - الحجاره الكلسية الصلبة
88	II 1-2-2 - حجاره البيوكلاست
89	II 1-3-3 - حجاره التوف أو الطف الكهفي
91	II 1-4-4 - الحجاره الكلسية ذات اللون البيج الفاتح
92	II 1-5-5 - حجاره الترافونتين
93	II 2-2-2 - الحجاره التزيينية
93	II 1-2-2-1 - الرّخام
94	II 2-1-1-1 - الرّخام الكلاسيكي الملون

## الفهرس العام

9 2	95	2-II-1-2- الرّخام الأبيض الرمادي النّقي
95		أ- رخام أبيض ذو حبيبات ناعمة
95		ب- رخام أبيض ذو حبيبات متوسطة
95		2-II-1-3- الرّخام الأبيض البلوري ذو الخطوط الرّمادية
96		2-II-2- أحجار متنوعة
96		أ- الحجر الكلسي الأسود من نوع نيرو القديم (Nero Antico)
96		ب- حجر جيرى ذو لون أصفر وردي باهت نوع الجبالو القديم
96		ج- حجر كلسي أحفوري ذو لون أصفر وردي باهت
97		د- حجر التّرافونتين الألباستر
97		III- مصدر حجارة بناء الموقع الأثري
102		IV- شكل وقياس القطع الحجرية
102		IV-1- الكتل الحجرية
102		IV-2- الدّيش أو الرّكام
103		V- تقنيات بناء الموقع الأثري
103		V-1- التّقنية الإفريقية Opus africanum
104		V-2- تقنيات النّظام الكبير Opus quadratum
104		V-3- تقنية السّنبله Opus spicatum
105		V-4- التّقنية القائمة على قطع الأجر Opus testaceum
106		V-5- التّقنية المركبة أو المختاطة Opus mixtum
107		الخلاصة
108		الفصل الثالث: عوامل ومظاهر تلف الحجارة
109		I- عوامل التّلف الحجارة
109		I-1- البنية الجوهريّة للحجارة
109		I-1-1- التّركيب المعدني

## الفهرس العام

111	I-1-2-المسامية
111	I-1-3-النسيج
112	I-1-4- الفواصل والعروق
113	I-1-5- الشقوق
113	I-2-عوامل التآف الخارجية
113	I-2-2-1-العوامل الميكانيكية
113	I-2-1-1-الزلازل والإهتزازات
114	I-2-1-2-الأحمال الميكانيكية
116	I-2-1-3-الرياح
118	I-2-1-4-التغير في درجة الحرارة
120	I-2-1-5-التجمد والذوبان
121	I-2-2-عوامل التآف الفيزيوكيميائية
122	I-2-2-1-الرطوبة
123	I-2-2-2-التساقط
126	I-2-2-3-المياه التآف السطحية
128	I-2-2-4-الأملح
129	I-2-2-5-التلوث
130	أ -غاز ثاني أكسيد الكربون CO2
131	ب- غاز ثاني أكسيد الكبريت (SO2)
133	ج- غاز ثاني أكسيد النيتروجين
134	I-2-3-عوامل التآف البيولوجي
134	I-2-3-1-الغطاء النباتي
136	I-2-3-2-الحيوانات
137	I-2-3-3-الحشرات
138	I-2-3-4-الكائنات الحية الدقيقة

## الفهرس العام

139	أ- البكتيريا
140	ب- الأشنات
141	ج- الفطريات
142	د- الطحالب
143	I-2-4- العامل البشري
144	I-2-4-1- الحروب
144	I-2-4-2- الحرائق
145	I-2-4-3- أعمال الهدم والتّخريب والتّشويه
146	I-2-4-4- تأثير النّشاط السّياحي
148	I-2-4-5- التّرميمات الخاطئة
151	I-2-4-6- مشكلة توافق المواد
152	I-2-4-7- عيوب التّنفيد (اتجاه توضع الكتل الحجرية)
<b>153</b>	<b>II- أهم أشكال ومظاهر التلف</b>
153	II-1- التّحلل وتشكيل الأخاديد
155	II-2- الشقوق والشروخ أو التصدع
156	II-3- الانفصام
157	II-4- الانفصال
158	II-5- التّجزؤ
158	II-6- التّجوف
591	II-7- التّقوب والتّقور
160	II-8- التّورق
161	II-9- التّقشر
161	II-10- تغيير اللّون والتّرسبات
162	أ- التّبّع
162	ب- الطّفح الملحي



## الفهرس العام

163	ج-تدهور الباتينة
164	د-التلوث أخضر
165	هـ-القشور السوداء
167	الخلاصة
681	الفصل الرابع: آلية التلّف المرتبطة بالجليد
169	I-عموميات حول الوسط المسامي للحجارة
169	I-1-المسامية والوسط المسامي
170	I-1-1 مفهوم المسامية
170	I-1-2- تصنيفات المسامية
170	I-1-2-1- التصنيف على أساس حجم المسام
170	I-1-2-2- تصنيف المسامية على أساس ارتباطها بعملية الترسيب
170	أ-مسامية مرتبطة بالترسيب الأولي
171	ب-مسامية مستقلة عن عملية الترسيب الأولي
171	I-1-2-3- تصنيف المسامية على أساس اتصال المسامات فيما بينها
172	II- الجليد
172	II-1- خصائص الجليد
172	II-1-1- زيادة حجم الماء
317	II-1-2- حجم الجليد
174	II-1-3- الخصائص الميكانيكية للجليد
175	II-1-4- تجمد الماء
177	II-2- تنظيم جزئيات الماء المتجمدة
177	II-3- أطوار الجليد
178	II-4- المياه غير المتجمدة في الوسط المسامي
179	أ-الماء الممتز
179	ب-مياه الشعرية

## الفهرس العام

- 180 ج- بخار الماء
- 181 II-3- دورات التّجمد والذّوبان التي تتعرض لها الحجارة
- 181 II-3-1- التّجمد والذّوبان اليومي
- 181 II-3-2- التّجمد والذّوبان الموسمي
- 182 II-3-3 أنواع الجليد
- 182 II-3-3-1- الجليد المتحرك
- 182 II-3-3-2- الجليد الإشعاعي
- 183 II-3-4- تأثير التضاريس على تشكّل الجليد
- 184 II-3-5- تصنيف مستوى جليد المنطقة
- 185 III- آليّة تجمد السّوائل والضّغوط المتولّدة في الحجارة
- 185 III-1- تجمد السّوائل في المسامات
- 185 III-2- تشكّل الجليد في الوسط المسامي
- 187 III-3- آليات تشكّل الضّغوط في الحجارة
- 187 III-3-1- نظرية الضّغوط الهيدروليكية
- 188 III-3-2- نظرية الضّغط الأسموزي
- 188 III-3-3- نظرية الضّغوط الشّعيرية (EVERETT 1961)
- 191 III-4- آليّة تدهور الحجارة تحت فعل الجليد
- 195 IV- مظاهر تلف الحجارة بفعل الجليد
- 195 IV-1- التّلف الدّاخلي
- 197 IV-2- التّلف الخارجيّ
- 197 IV-2-2- تقشر الحجارة
- 198 IV-2-3- الانفصام
- 199 IV-2-1- انفلاق الحجارة ECLATEMENT
- 199
- 200 IV-3- التّأثيرات الميكانيكية للجليد
- 201 V- العوامل المؤثرة على آليّة تدهور الحجارة المرتبطة بالجليد

## الفهرس العام

201	1-V - العوامل الداخليّة
201	1-1-V - نسيج الحجر
202	1-V-2- بنية الوسط المسامي للحجارة
202	1-V-3- خاصية النقل السوائل
203	1-V-4- البنية الهيكلية للحجارة
204	1-V-5- الخواص الميكانيكية
204	2-V- العوامل الخارجية
204	2-V-1- درجة الحرارة
205	2-V-2- محتوى الماء
207	2-V-3- طبيعة الماء داخل المسامات
207	أ- الماء المستطرب (Eau hygroskopique)
207	ب- الماء الحر
207	ج- ماء الرّبط Eau d'adhésion
207	2-V-5- تشيّع الحجارة
210	2-V-6- حجم العينات
212	3-V- العلاقة بين المسام والجليد
213	VI - المناهج التجريبية المختلفة لدراسة تأثير دورات التّجمد والذّوبان على الحجارة
215	VII - أساليب تقييم استدامة الحجارة للجليد
215	1-VII- اختيار المعلمات التجريبية
216	2-VII- المبادئ الأساسية لإجراءات قياسات تلف الحجر تحت تأثير الجليد
217	الخلاصة
218	الفصل الخامس: الجانب التطبيقي
219	I - عينات الدراسة
219	I-1- أخذ العينات
222	I-2- تحضير العينات

## الفهرس العام

- 223 I-3- أنواع الحجارة
- 225 II- بروتوكولات تحديد خواص الحجارة
- 225 II-1- تقنيات تحديد التركيب الكيميائي والمعدني
- 226 II-1-1- تعيين التركيب الكيميائي بطريقة فلورة الأشعة السينية
- 227 II-1-2- تعيين التركيب المعدني بطريقة حيود الأشعة السينية
- 228 II-2- بروتوكولات تعيين الخصائص الفيزيائية
- 229 II-2-1- الكثافة
- 230 II-2-2- خصائص الوسط المسامي
- 231 II-2-2-3- المسامية الكلية  $N_{tot}$
- 231 II-2-2-4- مسامية 48 ساعة (N48)
- 232 II-2-2-5- المسامية المحاصرة (Np)
- 232 II-2-2-6- معامل التشبع (S48)
- 233 II-2-3- معامل الإمتصاص
- 233 II-3- بروتوكولات تعيين الخصائص الميكانيكية للحجارة
- 233 II-3-1- الفحص بالموجات فوق الصوتية (Vp)
- 236 II-3-1-1- مؤشر الإستمرارية
- 237 II-3-2- اختبار مقاومة الميكانيكية للضغط أحادي المحور
- 238 II-3-3- اختبار صلابة الحجارة بجهاز الضّغط السّكليرومتر Scléromètre
- 240 II-4- اختبارات الشّيوخة الإصطناعية عن طريق دورات التّجمد والذّوبان
- 242 III- خصائص الحجارة قبل دورات التّجمد
- 243 III-1-1- التركيب الكيميائية
- 243 III-1-2- التركيب المعدنية
- 246 III-1-3- تحليل نتائج التركيب الكيميائية والمعدنية
- 247 III-3- الخصائص الفيزيائية للعيّنات قبل دروات التّجمد والذّوبان
- 247 III-3-1- الكثافة

## الفهرس العام

- 248 III-3-2 - المسامية الكلية
- 248 III-3-3 - معامل امتصاص الماء
- 249 III-3-4-تحليل نتائج الخصائص الفيزيائية للعينات قبل دورات التجمد والذوبان
- 250 III-4- الخصائص الميكانيكية للعينات قبل دورات التجمد والذوبان
- 250 III-4-1-تقدير سرعة الامواج فوق الصوتية  $V_p$
- 250 III-4-1-1- تقدير سرعة الامواج فوق الصوتية الأولية للعينات في المختبر
- 251 III-4-1-2- مؤشر الإستمرارية
- 252 III-4-1-3- تقدير سرعة الأمواج فوق الصوتية للحجارة في الموقع
- 254 III-4-2- تقدير المقاومة الميكانيكية للضغط أحادي المحور في المختبر
- 255 III-4-3- تقدير المقاومة الميكانيكية للحجارة في الموقع الأثري
- 258 III-5- العلاقة بين البنية المجهرية والخواص الفيزيائية والميكانيكية للحجارة السليمة
- 261 VI- خصائص الحجارة بعد دورات التجمد والذوبان**
- 261 VI-1- التقييم البصري
- 264 VI-2- تقييم الخصائص الفيزيائية والميكانيكية بعد دورات التجمد والذوبان
- 264 VI-2-1- تطور الخصائص الفيزيائية للعينات بعد دورات التجمد والذوبان
- 265 VI-2-1-1- تأثير دورات التجمد على مقدار فقدان الكتلة
- 266 VI-2-1-2- تأثير دورات التجمد والذوبان على الكثافة
- 268 VI-2-1-3- تأثير دورات التجمد والذوبان على المسامية
- 268 VI-2-1-4- تأثير دورات التجمد والذوبان على خاصية امتصاص الماء
- 271 VI-2-2- تطور الخصائص الميكانيكية للعينات بعد دورات التجمد والذوبان
- 271 VI-2-2-1- تأثير دورات التجمد والذوبان على سرعة الموجة فوق الصوتية
- 272 VI-2-2-2- تأثير دورات التجمد والذوبان على مؤشر الإستمرارية
- 274 VI-2-2-3- تأثير دورات التجمد والذوبان على المقاومة الميكانيكية للضغط
- 276 VI-3- تحليل النتائج
- 279 الخلاصة

## الفهرس العام

282	-الإقتراحات
282	1- تدابير الحماية
282	أ- إجراءات تخص محيط الموقع الأثري
284	ب- إجراءات تخص المعالم الأثرية
284	-علاج العيوب
286	- عزل الاسطح بمنتجات طاردة للماء
289	2-تدابير التنبؤ والإنذار بحدوث الجليد
290	أ-تجهيز الموقع بأجهزة لمراقبة التغيرات في درجات الحرارة
290	ب-تجهيز الموقع بأجهزة الكشف والإنذار بقروب حدوث الجليد
291	ج-تجهيز الموقع بوسائل للوقاية أو الحماية من الجليد
292	-النظام القائم على توليد الرياح
293	-النظام القائم على استخراج الهواء البارد
295	- النظام القائم على التسخين
295	*تسخين الهواء
297	*تسخين الاسطح
280	
300	الخاتمة
307	قائمة المراجع
318	الملاحق
335	فهرس الصور
343	فهرس الخرائط والمخططات
345	فهرس الأشكال
350	فهرس الجداول
353	الفهرس العام