

الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للحجارة الكلسية للمشكلة للقصور الصحراوية

**Physical and mechanical properties of the limestone rocks
that form desert palaces**

د. علي زعيتري

¹ المركز الجامعي شريف بوشوشة بافلو (الجزائر)، a.zaitri@cu-aflou.edu.dz

تاريخ القبول: 2026-04-16

تاريخ الإستلام: 2026-03-09

ملخص:

تعتبر الصخور الرسوبية من أهم المواد الأساسية المستعملة بكثرة في تشييد القصور الصحراوية وتكمن أهمية هذه الدراسة من خلال توصيف الخصائص الفيزيائية والبنوية لصخور الرسوبية الكلسية مأخوذة من مناطق صحراوية مختلفة، مع إبراز أهميتها في مجال صيانة وترميم المباني الأثرية المشيدة بالحجر الجيري. تؤكد النتائج أن الخصائص الفيزيائية للصخور الكلسية تتأثر بشكل واضح بتركيبها البلوري ومستوى الكربونات، وهو ما ينعكس على مقاومتها الميكانيكية وسلوكها تجاه الامتصاص المائي. وبناءً على ذلك، توفر هذه الدراسة إطاراً علمياً مفيداً لتقييم الأحجار الكلسية المستخدمة في المعالم الأثرية، كما تساهم في تحسين اختيار مواد الترميم المتوافقة وضمان استدامة عمليات الحفاظ على التراث المعماري في البيئات الصحراوية.

الكلمات المفتاحية: الصخور الرسوبية ، الخصائص الميكانيكية ، الخصائص الفيزيائية ، المناطق الصحراوية، الصيانة ، الترميم..

Abstract:

Sedimentary rocks are among the most important primary materials used in the construction of desert palaces. The significance of this study lies in its characterization of the physical and structural properties of calcareous sedimentary rocks collected from various desert regions, highlighting their importance in the conservation and restoration of archaeological buildings constructed of limestone. and carbonate content, which affects its mechanical strength and its water absorption behavior. Therefore, this study provides a valuable scientific framework for evaluating limestone used in historical monuments and contributes to improving the selection of suitable restoration materials, ensuring the sustainability of architectural heritage preservation in desert environments.

Keywords: Sedimentary rocks, mechanical properties, physical properties, desert regions, conservation, restoration

تُعد الصخور الرسوبية الكلسية من أكثر المواد الطبيعية استخدامًا في تشييد المباني التاريخية والمعالم الأثرية، خاصة في المناطق الجافة والصحراوية، مثل قصر عين ماضي وتويالة وتاجموت والحويطة بولاية الأغواط، حيث اعتمدت الحضارات القديمة على توفر هذه الصخور وسهولة تشكيلها في البناء. غير أن هذه المواد، رغم متانتها الظاهرة، تبقى عرضة لعمليات تدهور معقدة ناتجة عن عوامل التجوية الفيزيائية والكيميائية، مثل التغيرات الحرارية الشديدة، تبلور الأملاح، والرطوبة المتقطعة، مما يؤدي إلى تراجع خصائصها الميكانيكية وزيادة مساميتها وقابليتها للانحلال. ويُعد محتوى كربونات الكالسيوم أحد المؤشرات الأساسية التي تتحكم في سلوك الصخور الكلسية ومقاومتها لعوامل التلف، إذ يرتبط بشكل مباشر بدرجة التماسك البنيوي وبالتحولات المعدنية التي قد تطرأ خلال الزمن. ومن هنا تبرز أهمية دراسة البنية البلورية لهذه الصخور لفهم آليات التدهور التي تؤثر على المباني الأثرية المصنوعة منها. وفي هذا السياق، يمثل حيود الأشعة السينية (XRD) أداة دقيقة لتوصيف الأطوار المعدنية وحساب المسافات البينية بين المستويات البلورية اعتمادًا على قانون براغ، مما يسمح بالكشف عن التغيرات البنيوية التي قد تكون مسؤولة عن ضعف المادة أو قابليتها للتفتت.

وتتمحور الإشكالية العلمية لهذه الدراسة حول مدى تأثير الاختلافات البنيوية المستخلصة من تحليل XRD، إلى جانب التباين المكاني بين المواقع الصحراوية المختلفة للقصور الصحراوية والتي تم أخذ العينات منها على قرار كل من قصر عين ماضي وتويالة والحويطة وتاجموت، على تغير محتوى كربونات الكالسيوم والخصائص الفيزيائية للصخور الكلسية، خاصة تلك المرتبطة مباشرة بمقاومة مواد البناء الأثرية مثل الكتلة الحجمية، والامتصاص المائي، ومقاومة الضغط.

وانطلاقًا من ذلك، تفترض الدراسة أن هذه الصخور قد تُظهر فروقًا معنوية في خصائصها تبعًا لموقعها وبنيتها البلورية، مما قد ينعكس على قابليتها للاستعمال في الترميم أو على درجة هشاشتها في المنشآت التاريخية. وبناءً على هذه الرؤية.

تهدف الدراسة إلى تقديم توصيف متكامل لصخور كلسية رسوبية مأخوذة من مناطق صحراوية مختلفة، من خلال الجمع بين التحليل البلوري بواسطة XRD والاختبارات الفيزيائية والميكانيكية، إضافة إلى تطبيق تحليل التباين الثنائي (Two-way ANOVA) لتقييم أثر الموقع والمسافة البلورية والتفاعل بينهما على محتوى كربونات الكالسيوم.

وتكتسي هذه النتائج أهمية خاصة في مجال صيانة التراث المعماري، إذ تساهم في تحسين اختيار مواد الترميم وتقييم مدى توافقها مع الصخور الأصلية للمباني الأثرية مع تحديد آليات التلف التي تتعرض لها الصخور الرسوبية.

وللقيام بهذه الدراسة استعملت المنهج العلمي التجريبي وهذا ماتقتضيه التجارب التي أجريت على الصخور الكلسية لتعرف على خصائصها الفيزيائية والميكانيكية وكذا المنهج الإحصائي والتحليلي من خلال تحليل الجداول والمخططات البيانية.

وقد تمت معالجة النتائج بواسطة برنامج إحصائي SPSS إصدار 27 وقد تم الإشارة إلى المواقع الأثرية الأربعة التي أخذت منها العينات على النحو التالي : (1 Chen قصر عين ماضي) ، (2 Chant قصر تويالة) ، (3 Chant قصر الحويطة) ، (4 Chant قصر تاجموت) .

أولاً: طريقة العمل والوسائل المستعملة :

1.1 بالنسبة لتعيين النسيج الحبيبي تم استعمال مجهر مكبر لمعرفة نسيج العينات، أما بالنسبة للأشعة السينية تم استعمال إشعاع صيني وأحادي اللون، أما الجهاز المستعمل فهو D8 Advance لشركة BRUKER، والذي يعمل وفقاً لهندسة Bragg-Brentano.

وفيما يخص قياس نسبة كربونات الكالسيوم استعملنا جهاز كليسمتر برنارد الذي يتكون من أنبوب مدرج من 0 إلى 100 سم، يحتوى على سائل مُلوّن بغرض القراءة عليه والذي يُثَبَّت على حامل، يتصل أحد طرفي الأنبوب بقنينة الذي يُحدد به مستوى السائل (الحجم الابتدائي h_0) . (بوخنوف ارزقي، 2015)،

ولتحديد الكتلة الحجمية : نقوم بأخذ أجزاء من كل عينة ثم سحقها في هاؤن ومن ثم غريلة المسحوق المُتحصّل عليه في غربال فتحاته 100 ميكرون، ثم نغسل البيكنومتر لنضعه ليُجف في قُرن التجفيف التي تكون درجة حرارته ما بين 100 و 110 درجة مئوية، ثم نزنه فنحصل على ك1 (سليم قبوب، 2023) .

ولتعيين المسامية نقوم بتجفيف العينات في درجة حرارة 100° حتى الحصول على كتلة ثابتة ك1، ثم نضع العينات في حمام مائي في درجة حرارة مئوية لمدة ساعتين من الزمن، ثم نقوم بإخراجها وتبريدها بماء عادي ونزيل الماء السطحي بواسطة منشفة جافة ثم نزنها للحصول على ك2 (سليم قبوب، 2024) .

يمكن حساب المسامية الكلية بالعلاقة التالية

$$\text{م الكلية} = 1 - \frac{\text{كح الظاهرية}}{\text{كح الخصوصية}} \times 100 \%$$

ثانيا : تحليل النتائج

المشاهدة بواسطة المجهر الضوئي:

للتعرّف على مختلف العينات من خلال الصور الملتقطة على سطحها بواسطة كاميرا المجهر الضوئي جاءت النتائج على النحو التالي :



المصدر: من انجاز المؤلف ، عينة الحجر الكلسي تحت المجهر بتكبير 100

من خلال الصور نلاحظ ان النسيج حُببي للعينات غير مُنتظم، بحبيبات ذات أبعاد أقل من 300 ميكرومتر، وهي مُتلاحمة مع بعضها البعض.

جدول (01): تأثير الموقع (CHE) ضمن تحليل التباين الثنائي على محتوى كربونات

الكالسيوم (CaCO_3) مع نتائج اختبار $\text{Tukey HSD}^{a,b}$ للمقارنات البعدية

CaCO_3	Mean A ₁	Mean A ₂	Mean A ₃	Mean Moy
Chant 1	39.06±5.56	39.60±5.51	39.10±5.51	38.30±5.93a
Chant 2	25.12±4.41	25.12±3.71	25.10±4.52	25.15±5.02b
Chant 3	30.87±8.30	30.85±8.27	31.82±8.23	29.95±8.41c
Chant 4	33.25±1.76	33.60±1.55	33.65±0.91	32.50±2.82d

المصدر: من انجاز المؤلف باستعمال برنامج إحصائي SPSS إصدار 27

القيم التي تحتوي حروفا مختلفة تختلف معنويا عند مستوى دلالة ($p < 0.001$) وفق اختبار

.Tukey HSD^{a,b}

1.1 جدول (02): تأثير المسافة (Distance) ضمن تحليل التباين الثنائي على محتوى كربونات الكالسيوم (CaCO_3)

Distance	Mean A ₁	Mean A ₂	Mean A ₃	Mean Moy
80	28.53±6.07	28.92±6.20	29.02±6.16	27.55±5.76b
100	35.62±6.09	35.66±6.48	35.81±6.15	35.40±5.66a

المصدر: من انجاز المؤلف باستعمال برنامج إحصائي SPSS إصدار 27

القيم التي تحتوي حروفا مختلفة تختلف معنويا عند مستوى دلالة ($p < 0.001$) وفق اختبار

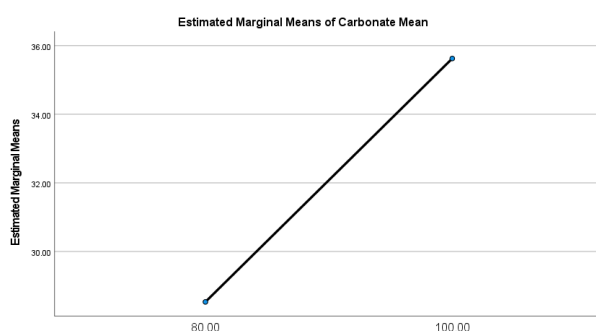
.Tukey HSD^{a,b}

1.1.1 أظهر تحليل التباين الثنائي (Two-way ANOVA) وجود تأثير معنوي قوي للموقع الميداني (CHE) على محتوى كربونات الكالسيوم في الصخور الرسوبية الكلسية

($F = 322.53$, $p < 0.001$)، مما يدل على وجود فروق واضحة بين المواقع الأربعة. كما تبين وجود تأثير معنوي للمسافة ($F = 495.78$, $p < 0.001$) (Distance)، حيث سجلت العينات عند مسافة 100 قيمة أعلى مقارنة بمسافة 80. إضافة إلى ذلك، أظهر التفاعل بين الموقع والمسافة دلالة

إحصائية قوية ($F = 36.06, p < 0.001$) ، مما يشير إلى أن تأثير المسافة يختلف حسب الموقع، وهو ما يعكس تغيرًا مكانيًا في ظروف الترسيب أو التأثيرات الدياجينية. وقد بلغت قيمة معامل التحديد $R^2 = 0.990$ ، مما يدل على قدرة النموذج العالية في تفسير التباين في محتوى الكربونات.

2.1.1 الشكل (01): تأثير المسافة على المتوسطات الهامشية المقدرة لمحتوى CaCO_3



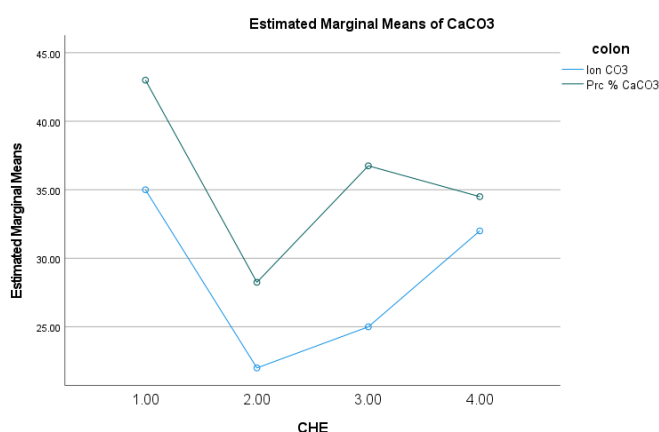
المصدر: من انجاز المؤلف باستعمال برنامج إحصائي SPSS إصدار 27

2.1 نلاحظ أن الكربونات ترتفع عند النسبة المئوية لكربونات الكالسيوم 100 في الأنبوبة الثانية مقارنة بأيونات الكربونات في الأنبوبة 80 في جميع مستويات CaCO_3 ، مما يدل على التأثير الواضح للغاز المنطلق CO_2 في الأنبوبة الأولى 80.

الشكل (02): المتوسطات الهامشية المقدرة لمحتوى CaCO_3 وفق التفاعل بين الموقع (CHE)

أيونات CO_3^{2-} والنسبة المئوية لكربونات الكالسيوم CaCO_3 في كلا الأنبوبتين

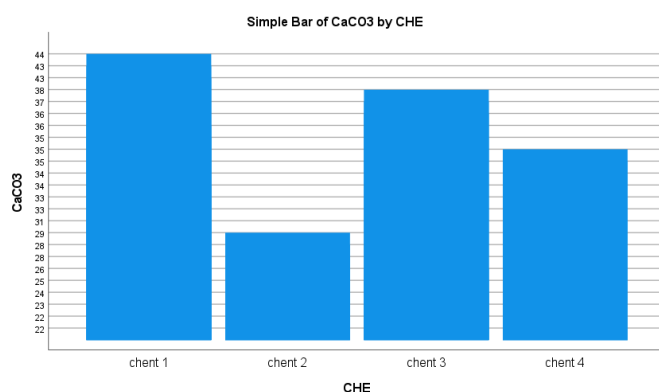
ضمن تحليل التباين الثنائي



المصدر: من انجاز المؤلف باستعمال برنامج إحصائي SPSS إصدار 27

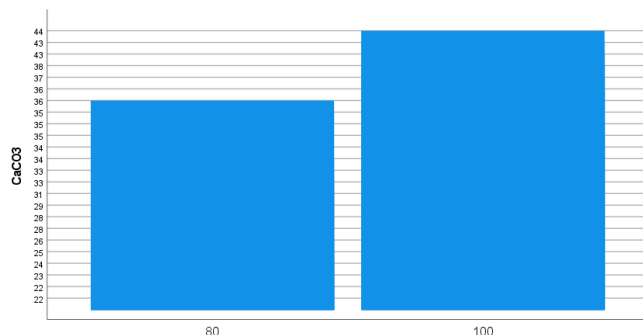
يوضح الشكل تغير متوسطات محتوى كربونات الكالسيوم المقدر في العينات الرسوبية الكلسية المدروسة مع المقارنة بين طريقتي التقدير المعتمدتين لنفس العينة , حيث تم في الأنبوبة الأولى تقدير أيونات الكربونات CO_3^- وفي الأنبوبة الثانية تحديد النسبة المئوية لكربونات الكالسيوم CaCO_3 %. تشير النتائج إلى تسجيل قيم أعلى في نسبة كربونات الكالسيوم مقارنة بأيونات الكربونات ، مما قد يعكس زيادة في نقاوة الترسيب الكلسي أو انخفاضاً في الإمداد الفتاتي. كما يظهر تباين واضح بين العينات الأربع، حيث سجلت العينة الأولى أعلى محتوى كلسي، في حين انخفضت القيم في العينة الثانية، ثم ارتفعت تدريجياً في العينتين الثالثة والرابعة. إن عدم توازي المنحنيات يدل على وجود تفاعل بين العينة وطريق القياس، مما يدل على أن الاختلاف بين التقدير أيونات الكربونات وتحديد النسبة المئوية لكربونات الكالسيوم يختلف باختلاف خصائص العينة .

الشكل (03):متوسط محتوى CaCO_3 حسب المواقع (CHE)



المصدر: من انجاز المؤلف باستعمال برنامج إحصائي SPSS إصدار 27

الشكل (04): متوسطات محتوى CaCO_3 حسب من أيونات CO_3^- والنسبة المئوية لكربونات الكالسيوم CaCO_3 في كلا الأنبوبتين



المصدر: من انجاز المؤلف باستعمال برنامج إحصائي SPSS إصدار 27

من خلال الشكلين يظهر وجود تأثير معنوي لكل من أيونات CO_3^- والنسبة المئوية % لكربونات الكالسيوم CaCO_3 في كلا الأنبوبتين والمواقع إضافة إلى وجود تفاعل بينهما في تحديد محتوى كربونات الكالسيوم CaCO_3 .

ثانياً: تحليل العينات باستعمال الأشعة السينية

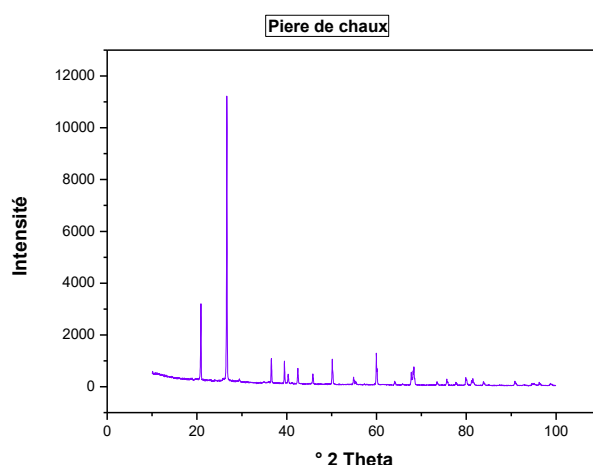
الجدول (03): التركيب الكيميائي للحجر الكلسي

إن استخدام تقنية الأشعة السينية تسمح لنا معرفة المكونات الكيميائية وكذلك النسب الوزنية لمختلف العناصر الداخلة في تركيب الحجر الجيري وبين لنا الجدول نتائج التحليل الكيميائي :

الأوكسيد	SO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaCO_3	مواد أخرى
النسبة الوزنية %	11	2.7	0.1	4	51	15

وقد تحصلنا على النتائج المبينة بإجراء التحليل السطحي بواسطة المجهر الماسح (MEB)

الشكل (05) : قياس حيود الأشعة السينية لمادة الحجر الكلسي



المصدر: من انجاز المؤلف

يوضح نمط حيود الأشعة السينية (XRD) لمادة الحجر الجيري وجود قمم حيود حادة ومميزة تشير إلى الطبيعة البلورية الجيدة للعينة. تظهر القمة الرئيسية عند زاوية 2θ ، وهي قمة مميزة لمعدن الكالسيت (CaCO_3)، مما يؤكد أن الطور المعدني السائد في العينة هو كربونات الكالسيوم. كما تُلاحظ قمم ثانوية عند زوايا مختلفة تتوافق مع الانعكاسات البلورية المعروفة للكالسيت، مما يعزز

دلالة النقاوة النسبية للعينه وعدم وجود أطوار معدنية رئيسية أخرى بكميات كبيرة. وتشير شدة القمم وحدتها إلى درجة تبلور جيدة لمادة الحجر الجيري المدروسة.

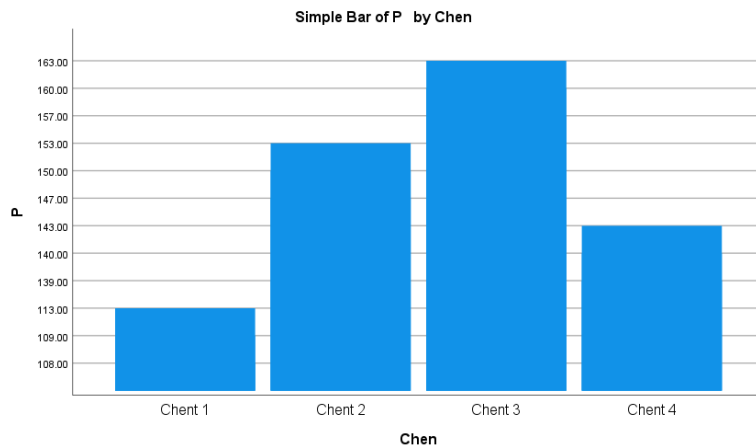
الجدول (04): عينة الحجر الكلسي

Chen	P1(Pascal)	P2(Pascal)	P3(Pascal)
Chen 1	109	108	113
Chen 2	147	153	150
Chen 3	157	160	163
Chen 4	140	143	139
P MOY(Pascal)	140.1667		

المصدر: من انجاز المؤلف باستعمال برنامج إحصائي SPSS إصدار 27

من خلال النتائج المحصل عليها لعينات الحجر الكلسي نلاحظ أن مقاومة الضغط متوسطة نوعاً ما وأن نتائج كل العينات هي متقاربة بدرجة كبيرة من حيث الصلابة، وهذا راجع أساساً إلى طبيعة تكوين هذه المادة وأن متوسط الضغط لهذه المادة في كل العينات كما هو مبين في الجدول هو 140.16 باسكال .

الشكل (06): التمثيل البياني لقيم الضغط في العينات المدروسة



المصدر: من انجاز المؤلف باستعمال برنامج إحصائي SPSS إصدار 27

يوضح الرسم البياني التباين في قيم الضغط بين الحالات الأربع، حيث سجلت العينة Chen 3 القيمة القصوى بينما سجلت العينة Chen 1 القيمة الدنيا. يمكن تفسير هذا الاختلاف بوجود تأثير محتمل مباشر للعوامل التجريبية المرتبطة بكل حالة، مثل اختلاف ظروف التشغيل أو

الخصائص الفيزيائية للمادة قيد الدراسة، مما أدى إلى تغير مستوى الضغط. كما يشير الانخفاض في العينة Chen 4 بعد الارتفاع في Chen 3 إلى أن العلاقة ليست خطية تمامًا، وقد تكون مرتبطة بحدود معينة للنظام أو بمتغيرات إضافية مؤثرة. بشكل عام، تؤكد النتائج أن الضغط يتأثر بشكل واضح بتغير الحالات قيد الدراسة، مما يستدعي مزيدًا من التحليل لتحديد الأسباب الدقيقة.

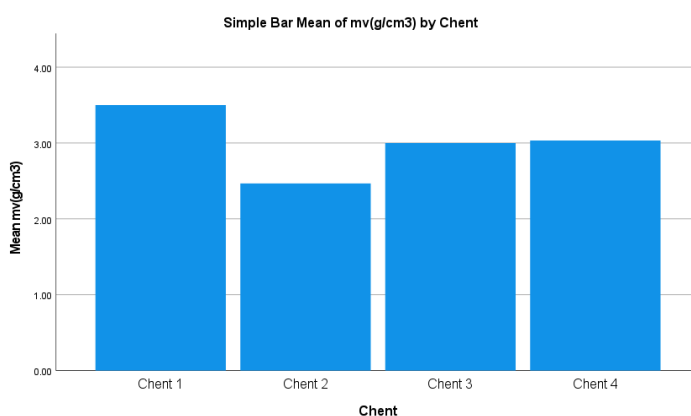
الجدول (05): نتائج الكتلة الحجمية : هذه التجربة أقيمت على أربع عيّينات من كل مادة لتمكن من معرفة القيمة المتوسطة ونتائج مُحصل عليها مدونة في الجدول .

Chent	mv1(g/cm3)	mv2(g/cm3)	mv3(g/cm3)
Chen 1	3.5	3.2	3.8
Chen 2	2.1	2.5	2.8
Chen 3	3.1	3	2.9
Chen 4	2.5	3.4	3.2
m v MOY		3	

المصدر: من انجاز المؤلف باستعمال برنامج إحصائي SPSS إصدار 27

يوضح الجدول نتائج قياسات الكتلة الحجمية لعينات المواد المدروسة (Chen 1 Chen 4 - عبر ثلاث محاولات تجريبية (mv1 ، mv2 ، mv3) تُظهر البيانات تباينًا نسبيًا بين القيم المسجلة لكل عينة، مما يعكس اختلافًا في الخصائص الفيزيائية للبنية الداخلية للمواد. وتسجل العينة Chen 1 أعلى قيم للكتلة الحجمية مقارنة ببقية العينات، في حين تُظهر العينات الأخرى قيمًا متقاربة مع اختلافات طفيفة بين المحاولات. كما يشير متوسط الكتلة الحجمية المحسوب إلى استقرار عام في النتائج، مما يعزز موثوقية القياسات ويؤكد إمكانية اعتمادها في التحليل المقارن بين العينات.

الشكل (07): تمثيل بياني يوضح الاختلاف في الكتلة الحجمية للعينات المدروسة



انجاز

المصدر : من

المؤلف باستعمال برنامج

يوضح الرسم البياني المستخلص من نتائج الجدول السابق مقارنة متوسط الكتلة الحجمية ρ بين العينات الأربع (Chen 1–Chen 4) تُظهر النتائج أن العينة Chen 1 تمتلك أعلى متوسط للكتلة الحجمية، مما يدل على بنية أكثر تماسكاً أو كثافة مقارنة ببقية العينات. في المقابل، تسجل العينة Chen 2 أدنى قيمة، وهو ما قد يعكس وجود مسامية أكبر أو انخفاضاً في درجة الانضغاط الداخلي للمادة. أما العينتان Chen 3 و Chen 4 فتظهران قيمًا متقاربة ومتوسطة، مما يشير إلى خصائص فيزيائية شبه متجانسة بينهما. وبشكل عام، يبرز هذا التمثيل البياني وجود فروق واضحة في الكتلة الحجمية بين العينات، مما يعكس تأثير الاختلافات البنيوية أو التركيبية على الخصائص المادية المدروسة.

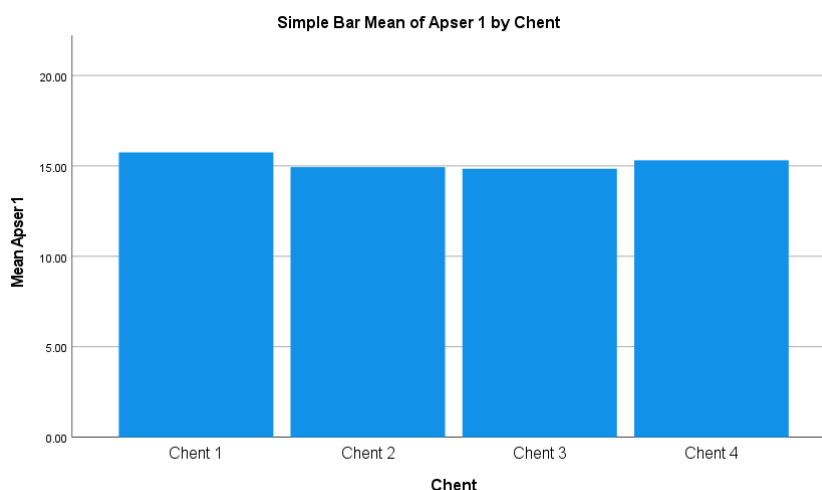
الجدول (06): نتائج الامتصاص للعينات المدروسة للحجر الكلس

Chent	Apser 1	Apser 2	Apser 3
Chent 1	15.75	15.63	15.87
Chent 2	14.69	14.99	15.12
Chent 3	14.88	14.65	15.01
Chent 4	15.14	15.26	15.54
ApserMOY		15,21	

المصدر: من انجاز المؤلف باستعمال برنامج إحصائي SPSS إصدار 27

يوضح الجدول نتائج اختبار الامتصاص المائي (Apser) للعينات الأربع (Chen 1-Chen 4) عبر ثلاث قياسات متتالية (Apser 1، Apser 2، Apser 3) بالإضافة إلى المتوسط العام (ApserMOY). تشير القيم المسجلة إلى تقارب واضح بين العينات، حيث تتراوح نسب الامتصاص بين حوالي 14.65 و 15.87، مما يدل على تجانس نسبي في سلوك الامتصاص المائي للمواد المدروسة. وتسجل العينة Chen 1 أعلى قيم امتصاص مقارنة ببقية العينات، وهو ما قد يعكس زيادة في المسامية أو قدرة أكبر على احتجاز الماء. في المقابل، تظهر العينة Chen 2 أقل متوسط امتصاص، مما يشير إلى بنية أكثر كثافة وأقل نفاذية. وبشكل عام، تؤكد النتائج أن الفروق بين العينات محدودة، إلا أنها تعكس تأثير الاختلافات البنيوية على خاصية الامتصاص المائي.

شكل (08): تمثيل بياني لامتناسية الماء في العينات المدروسة



المصدر: من انجاز المؤلف باستعمال برنامج إحصائي SPSS إصدار 27

يوضح الرسم البياني متوسط امتصاص الماء (Mean Apser 1) للعينات الأربع، حيث تظهر القيم متقاربة نسبياً بين جميع العينات. تسجل العينة Chen 1 أعلى متوسط امتصاص، تليها Chen 4، بينما تظهر Chen 2 و Chen 3 قيماً أقل ومتقاربة. يشير هذا التقارب إلى تجانس نسبي في خاصية الامتناس الماءي، مع فروق طفيفة قد تعود إلى اختلافات في البنية المسامية لكل عينة.

خاتمة:

أبرزت نتائج هذه الدراسة وجود تباين معنوي في محتوى كربونات الكالسيوم والخصائص الفيزيائية والميكانيكية للصخور الرسوبية الكلسية المدروسة، حيث أظهرت العينات اختلافات في الكتلة الحجمية، الامتناس الماءي، ومقاومة الضغط، وهي خصائص تعد حاسمة في تقييم متانة مواد البناء الأثرية. كما مكن تحليل حيود الأشعة السينية (XRD) من الكشف عن اختلافات في المسافات البينية البلورية، مما يشير إلى تغيرات بنيوية دقيقة داخل الأطوار الكربوناتيّة قد تفسر تباين مقاومة الصخور لعوامل التجوية والتدهور. وقد أكد تحليل التباين الثنائي (Two-way ANOVA) وجود تأثير معنوي قوي لكل من الموقع والبنية البلورية على محتوى، إضافة إلى تفاعل إحصائي بين العاملين، مما يدل على أن استجابة الصخور الكلسية للعوامل البيئية ليست متجانسة بل ترتبط بخصائصها المعدنية المحلية. وتبرز أهمية هذه النتائج في مجال صيانة وترميم المباني الأثرية، إذ توفر قاعدة علمية لفهم أسباب تدهور الأحجار الكلسية المستخدمة تاريخياً، كما تساعد في اختيار مواد ترميم متوافقة من حيث التركيب البنيوي والخواص الفيزيائية، بما يضمن استدامة التدخلات الترميمية والحفاظ على القيمة التاريخية للمعالم. وبشكل عام، تؤكد

هذه الدراسة ضرورة التكامل بين التحليل البلوري والإحصائي والاختبارات الميكانيكية في تقييم مواد البناء الأثرية، وتفتح المجال أمام أبحاث مستقبلية أكثر تفصيلاً تشمل تأثير الأملاح، دور المسامية الدقيقة، وتقنيات التحليل المتقدم من أجل تطوير استراتيجيات فعالة لحماية التراث المعماري في البيئات الصحراوية.

الاحالات والمراجع :

1. عادل محمد رفعت، مقدمة في علم الصخور ط 1، دار القلم ت الكويت، 1983، ص 99
2. دنكان، الجيولوجيا الهندسية وميكانيكيات الصخور " تر، محمد كنانة ثابت، الجزء الأول، دار الطباعة والنش، الموصل، 1980، ص 178 .
- الرسائل الجامعية :
3. بوخنوف أرزقي، تشخيص الطوب لهياكل قصري النزلة وتماسين (ولاية ورقلة)، رسالة دكتوراه، معهد الآثار، جامعة الجزائر 2، 2011، ص 146 .
4. معتز بوعكاز ، طرق حفظ وصيانة مواد البناء الموقع الاثري جميلة " حالة الحجارة الكلسية، رسالة ماجستير ، معهد الآثار ، 2010 . ص 145 .

المقالات العلمية :

5. معتز بوعكاز، التحليل باستخدام المطيافية بالأشعة الحمراء لحجارة المباني الأثرية، مجلة التراث، جامعة زيان عاشور بالجلفة ، المجلد 7 ، العدد 2 ، ص ص 407 ، 4010.
6. قبوب سليم ، دحماني مليكة ، مواد وتقنيات البناء قصر تويالة الأثري بالاغواط ، مجلة هرودوت للعلوم الانسانية والاجتماعية، مجلد 7 ، عدد3 ، ص ص 245 253.

References and citations:

1. Adel Mohamed Refaat, Introduction to Petrology, 1st ed., Dar Al-Qalam, Kuwait, 1983, p. 99.
2. Duncan, Engineering Geology and Rock Mechanics, trans. Mohamed Kinana Thabet, Part 1, Dar Al-Tiba'a Wal-Nashr, Mosul, 1980, p. 178.
- University Theses:
3. Boukhnouf Arzki, Brick Diagnosis of the Structures of the Palaces of El-Nezla and Tamassin (Ouargla Province), PhD dissertation, Institute of Archaeology, University of Algiers 2, 2011, p. 146.
4. Moataz Bouakkaz, Methods of Preserving and Maintaining Building Materials at the Archaeological Site of Djemila: The Case of Limestone, Master's thesis, Institute of Archaeology, 2010, p. 145.
- Scientific Articles:

5. Moataz Bouakkaz, Analysis using Infrared Spectroscopy of Stones from Archaeological Buildings, Heritage Journal, Ziane Achour University of Djelfa, Volume 7, Issue 2, pp. 407, 4010.
6. Kaboub Salim, Dahmani Malika, Building Materials and Techniques of the Archaeological Palace of Touyala in Laghouat, Herodotus Journal of Human and Social Sciences, Volume 7, Issue 3, pp. 245-253.