

Unveiling the Secrets of Ancient Waterproofing: A Multi-Analytical Characterization of Traditional Qadhad Mortar from Sira Castle, Yemen

Sarhan Al-Gawi*, M.A. Al-Gorafi , Abdulwahab M. Al-Nono

Department of civil Engineering, Faculty of Engineering, Sana'a University, Sana'a, Yemen.

*Corresponding author: omerabdulah062@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 7- March-2026,

Revised: 7- April -2026,

Accepted: 14- April- 2024

Published: 28 May 2025

Keywords:

1. Yemeni plaster
2. Traditional building materials
3. Waterproofing material
4. Characterization
5. XRD
6. XRF
7. SEM

ABSTRACT

Qadhad is one of the most prominent traditional construction materials in Yemeni architecture, it has been used for centuries in lining cisterns, roofs, and hydraulic structures due to its high resistance to water and moisture, as well as its remarkable long-term durability. This study aims to characterize and analyze the properties of traditional Qadhad used in the historic Sira Castle in Aden City, thereby providing a scientific basis for its reproduction with comparable performance in contemporary conservation and construction as a waterproofing material. Physical tests (apparent density, open porosity, water absorption, and capillary absorption), hydraulic tests (permeability and hydraulic indices), and mineralogical analyses (XRD, XRF, SEM-EDS) were conducted in accordance with international standards. The results indicated that the apparent density of the Sira Castle Qadhad reached 1740 kg/m^3 , while the open porosity was 19.6%. The water absorption was 11.27%, and the permeability coefficient was approximately $6.55 \times 10^{-9} \text{ m/s}$, demonstrating an exceptional ability to resist water infiltration and an excellent balance between density and durability. The mineral analyses (XRD and XRF) revealed the mineralogical and chemical composition of the Qadhad, while SEM-EDS micrographs showed its dense microstructure formed by calcium and aluminum hydrate gels that fill the pores, granting the material outstanding waterproofing performance that has endured for centuries in coastal environments.



كشف أسرار الغزل المائي الأثري: توصيف متعدد التقنيات لملاط القضاض التقليدي من قلعة صيرة في اليمن

سرحان علي مصلح الغاوي*، محمد الجرافي، عبد الوهاب النونو

قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة صنعاء، صنعاء، اليمن.

*Corresponding author: sarhanalialqawy@gmail.com

الكلمات المفتاحية

القضاض اليمني
مواد البناء التقليدية
مادة عازلة للماء
توصيف
XRD-XRF-SEM

معلومات المقالة

تاريخ التقديم: 7 -مارس-2026

تاريخ القبول: 7-ابريل-2026

تاريخ النشر: 28- مايو -2026

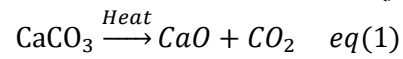
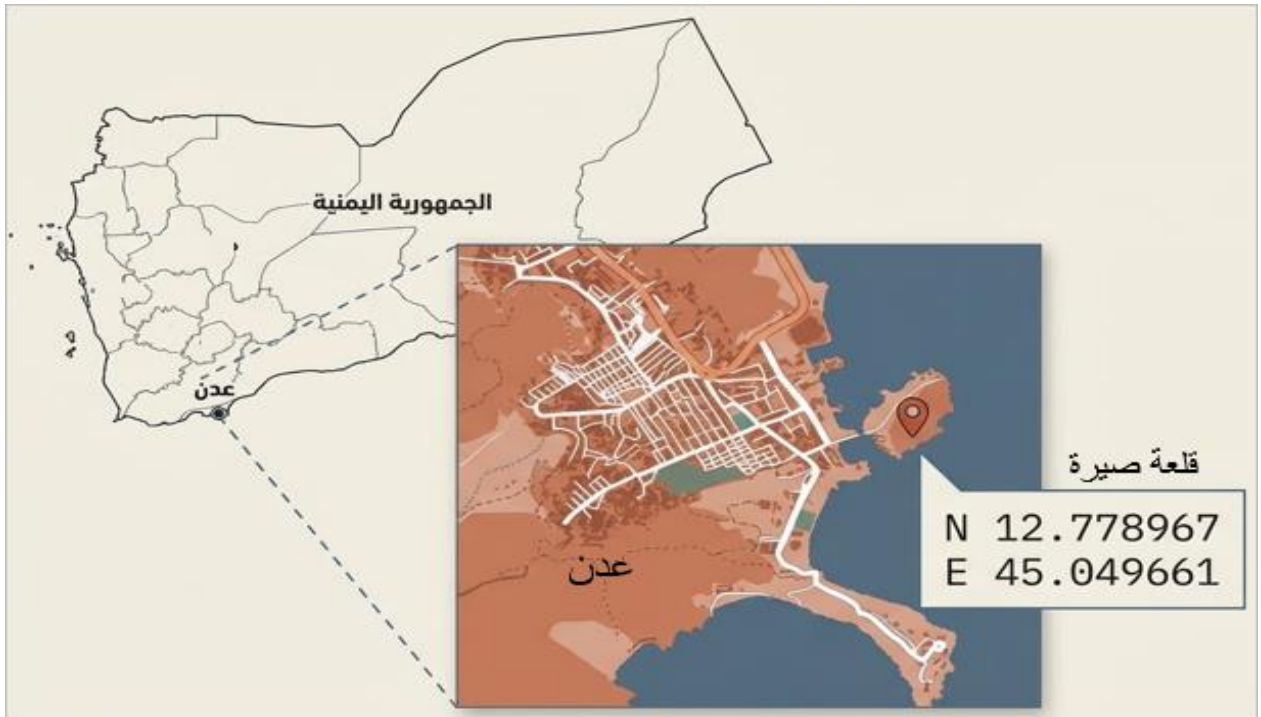
الملخص:

يعد القضاض من أبرز المواد الإنشائية التراثية في العمارة اليمنية، إذ استُخدم منذ قرون في تبطين الصهاريج والأسطح والمنشآت المائية؛ لما يتميز به من مقاومة عالية للماء والرطوبة وثبات طويل الأمد حتى الآن، وتهدف هذه الدراسة إلى توصيف وتحليل خصائص مادة القضاض التقليدية المستخدمة في قلعة صيرة التاريخية في مدينة عدن، كنموذج يمكن تعميمه لإعادة إنتاج القضاض في الوقت الحاضر بكفاءته العالية تفسر، كمادة عازلة، وقد أُجريت الاختبارات الفيزيائية: (الكثافة الظاهرية، المسامية المفتوحة، امتصاص الماء، الامتصاص الشعري)، والهيدروليكية (النفاذية، المؤشرات الهيدروليكية)، والمعدنية (XRD، XRF، SEM-EDS) وفقاً للمعايير الدولية، وأظهرت النتائج أن قيمة الكثافة الظاهرية لقضاض قلعة صيرة بلغت 1740 كجم/م³، بينما سجلت المسامية المفتوحة نسبة 19.6%، في حين تراوحت قيمة الامتصاص المائي عند 11.27%، ومعامل النفاذية في حدود 6.55×10^{-9} م/ث؛ مما يدل على قدرة مميزة على مقاومة تسرب المياه وتوازن ممتاز بين الكثافة والمتانة، كما أظهرت النتائج الاختبارات المعدنية (XRD، XRF) التركيب المعدني والكيميائي للقضاض، وأوضحت نتائج التصوير الإلكتروني (SEM-EDS) أن التركيب الكثيف للقضاض جاء بسبب تكون هلام الهيدريت الكالسيوم ألومينات التي تعمل على إغلاق مسامات القضاض؛ مما يمنحه مواصفات رائعة، ومادة عازل للماء لمئات السنين في البيئات الساحلية.

1. المقدمة (Introduction)

تُعد قلعة صيرة الواقعة في مدينة عدن عند الإحداثيات الجغرافية (45.050 N 12.779, E)، كما هو موضح في (الشكل 1)، نموذجاً معمارياً بارزاً لعمارة القلاع البحرية (الشكل 2)، حيث أظهرت المشاهدات الميدانية أن طبقات القضاض في القلعة ما زالت محتفظة بصلابتها ومظهرها الأصلي، رغم تعرضها لعوامل التجوية البحرية لأكثر من خمسمئة عام؛ مما يدل على كفاءة هذه المادة في مقاومة التدهور البيئي. ويعود سبب اختيار قلعة صيرة إلى موقعها الساحلي؛ مما يجعل مقاومتها لتأثيرات الرطوبة والحرارة إنجازاً هندسياً متميزاً، كما أن الملاط الجيري التقليدي المشابه في تكوينه لمادة القضاض والمكون من الجير المطفأ المخلوط بالركام والرماد، قد خضع لدراسات مكثفة في المنشآت الأثرية لحضارات متنوعة، مثل الرومانية والتركبة والهندية، ولا تزال في حالة جيدة [4-7].

يعد القضاض من أبرز المواد الإنشائية في تراث العمارة اليمنية، إذ استُخدم منذ قرون كملاط لربط أحجار البناء، كما استُخدم أيضاً في تبطين الصهاريج والأسطح والمنشآت المائية؛ لما يتميز به من مقاومة عالية للماء والرطوبة، وثبات طويل الأمد لمئات السنين، ولا تزال تؤدي وظيفتها بكفاءة حتى الآن [1]، وقد مثّل استخدام القضاض تطوراً هندسياً وتقنياً متقدماً في العمارة اليمنية القديمة. وتكمن ديمومة القضاض في طبيعته المركبة الناتجة عن تفاعل الجير المطفأ المحروق مع مكونات بوزلانية محلية مثل الرماد البركاني والرمل السيليسي؛ ما يمنحها خصائص هيدروليكية استثنائية تعمل كعازل للماء [2,3]، كما هو موضح في المعادلات الآتية:



الشكل 1: الموقع الجغرافي لقلعة صيرة في مدينة عدن (اليمن) كمصدر لعينة القضاض المدروسة.



قلعة صيرة الأثرية



مادة القضاض المستخدمة لربط جدران قلعة صيرة

الشكل 2: مشهد عام لقلعة صيرة الأثرية حيث جُمعت منها عينات مادة القضاض.

وأجرى الغاوي وآخرون [11]، دراسة لخصائص مادة القضاض البيني التقليدية المستخدمة في صهاريج عدن كمادة عازلة للماء، حيث خضعت العينات لاختبارات فيزيائية وهيدروليكية ومعنوية وفق المعايير الدولية، وأظهرت النتائج كفاءة عالية في منع تسرب المياه، كما كشفت التحليلات المعنوية (XRD, XRF) عن التركيبين المعدني والكيميائي للمادة؛ مما أسهم في فهم آليات أدائها العازل، وتعد دراسة الغاوي وآخرون [11] الأولى التي تناولت القضاض كعازل للماء في المنشآت المائية، بالإضافة إلى كونها مادة رابطة، بينما ركزت دراسة [2] على القضاض كمادة رابطة إنشائية واختبارات أقل.

وبهدف تأكيد نتائج دراسة الغاوي وآخرون [11]، تم تعزيز الدراسة لتشمل عينة القضاض من موقع آخر، وهو مبنى قلعة صيرة، الذي يتميز بأنه يستخدم فيه مادة رابطة، بالإضافة إلى كونه عازلاً للرطوبة في المناطق الساحلية، وذلك للتأكد من خصائصه وتحديد نسب مكوناته بدقة عالية؛ مما يوفر أساساً علمياً لإعادة إنتاجه بأداء مماثل للخرانات القديمة التي لا تزال تعمل بكفاءة حتى الآن باستخدام تقنيات حديثة.

وبالتالي، فإن هدف البحث هو إجراء دراسة تفصيلية لقضاض قلعة صيرة الأثرية في عدن لتحديد خصائصه كعازل للماء، مثل الخصائص الفيزيائية: (الكثافة الظاهرية، المسامية المفتوحة، امتصاص الماء، الامتصاص الشعري)، والخصائص

وقد حلت مكونات هذا الملاط بدقة باستخدام تقنيات اختبار حديثة ومتنوعة، مثل حيود الأشعة السينية (XRD)، والتحليل الطيفي الفلوري (XRF)، والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM-EDS)؛ وذلك بهدف فهم خصائصه وإعادة إنتاجه [8,9]. وقد أثبتت الأبحاث أن هذه الملاط الجيرية الهيدروليكية الطبيعية تكتسب صلابتها بفضل التفاعل البوزولاني بين هيدروكسيد الكالسيوم والسيليكا والألومينا الموجودة في الإضافات [2,6]. وتؤدي هذه التفاعلات إلى تكوين مركبات هيدرات سيليكات الكالسيوم (C-S-H) وهيدرات الأمينات الكالسيوم (C-A-H)، وهي المسؤولة عن ترصص البنية وتقليل المسامية والنفاذية [6]. وقد أشارت دراسات سابقة إلى أن ارتفاع نسبة السيليكا والألومينا في الخلطة التقليدية يُعزز الأداء الهيدروليكي للمادة، ويزيد مقاومتها للماء [6,10].

وعلى المستوى المحلي، تعد الأبحاث التي تناولت القضاض في اليمن كمادة إنشائية قليلة جداً، وغالباً ما اقتصر على الطابع الوصفي والميداني لاستنتاج مكونات القضاض بناء على الخبرة الحالية، دون الاعتماد على الاختبارات الحديثة لتوصيف القضاض المستخدم منذ مئات السنين والذي لا يزال يعمل بكفاءة [3]، وقد قام الباحث C. Weiss and I. Gerlach [2] بدراسة القضاض المستخدم في سد مأرب القديم باستخدام الاختبارات الحديثة كمادة إنشائية رابطة، وليس كعازل للماء.

2.2 الفحص البصري:

بداية أجري الفحص البصري للقضاض في قلعة صيرة. ومن ثم تم تحديد أماكن أخذ العينات، بحيث لا تؤثر سلباً على المنشأ الأثري، كما هو موضح في (الشكل 3)، وتم تسجيل نتائج الفحص من حيث اللون والشكل والملمس.

2.3 تجميع العينات:

جمعت العينات مباشرة من الجدران القديمة للقلعة، مع توخي أقصى درجات الحرص؛ لضمان الحفاظ على سلامة البنية الأثرية، حيث تم أخذ العينات الأصلية من موقع واحد من أعلى جدران القلعة المكشوفة، والتي تعد الأكثر تعرضاً لتأثيرات الرطوبة والحرارة، كما هو موضح في (الجدول 1) و (الشكل 3).



الشكل (3) العينة المجمة ومنطقة أخذ العينة منها.

2. المواد وطرق البحث:

2.1 العينة:

تم اختيار عينة القضاض من مبنى قلعة صيرة المستخدم كمادة رابطة، وعازلة للرطوبة في المناطق الساحلية.

2.4 الاختبارات:

المذكورة في (الجدول 1)، كما هو موضح في (الشكل 4-C، A، B)، وبين الجدول كذلك عدد العينات لكل اختبار، حيث تم اختيار 6 عينات لكل من الاختبارات الفيزيائية والهيدروليكية (ماعدا اختبار النفاذية، حيث تم الاكتفاء بالحد الأدنى 3 عينات؛

تم إجراء الاختبارات الفيزيائية التي تشمل: الكثافة الظاهرية، والمسامية المفتوحة، وامتصاص الماء، بالإضافة إلى الاختبارات الهيدروليكية لتحديد الخصائص الهيدروليكية للقضاض، والتي تشمل النفاذية، والامتصاص الشعري؛ وذلك بناءً على المواصفات القياسية، وتم تجهيز عينات الاختبارات وفقاً للمواصفات القياسية

للحصول على عينة مسطحة وذات سطح أملس، فتجانس العينة بسطح أملس يضمن جودة النتائج، وبعد ذلك، عُرِضَت العينة لحزمة من الأشعة السينية، وتم تسجيل أنماط الحيود الناتجة التي تمثل بصمة مميزة لكل معدن، وقد تم تحليل هذه الأنماط باستخدام برنامج (DIFFRAC.EVA) [14,15]؛ ثم مطابقة القمم المسجلة مع قاعدة البيانات المرجعية (ICCD PDF) [16]، لتحديد الأطوار المعدنية الموجودة في العينة، وتقدير نسبها شبه الكمية.

وقد تم إجراء التحليل الكيميائي باستخدام اختبار فلورية الأشعة السينية (XRF)؛ لتحديد التركيب الكيميائي، والنسب الوزنية للأكاسيد المعدنية المكونة لمادة القضاض، حيث طُحِنَت العينة وتم تحويلها إلى مسحوق ناعم، ثم كُبِسَت على هيئة قرص ثابت، بعد ذلك تم تعريضها لحزمة من الأشعة السينية، مما أدى إلى إثارة ذرات العينة وانبعاث أشعة سينية ثانوية بطيف مميز لكل عنصر.

نظراً لطبيعة الاختبار)، وتم حساب المتوسط الحسابي وإهمال القيم التي شذت بقيمة أكبر من ضعف التباين.

وقد تم إجراء اختبار التدرج الحبيبي للركام باستخدام التحليل المنخلي للجسيمات الأكبر من 3 مم، وفقاً للمعيار الدولي

(C136/C136M ASTM) [12]، بينما تم إجراء التحليل بالمجهر الضوئي للمادة الرابطة ذات الجسيمات الأقل من 3 مم وفقاً للمعيار الدولي (ASTM E112) [13]، حيث شمل إعداد شرائح رقيقة ومصقولة من العينات وفحصها تحت المجهر الضوئي بتكبير (100x) مع النقاط صور رقمية عالية الدقة للبنية المجهرية، وتم تحليل هذه الصور باستخدام برنامج Zeiss Microscopy) لتحديد توزيع حجم الحبيبات بدقة.

وقد تم إجراء التحليل المعدني باستخدام حيود الأشعة السينية (XRD) لتحديد الأطوار البلورية والمعادن المكونة لمادة القضاض، حيث تم إعداد العينة بطحنها لتصبح مسحوقاً متجانساً، ثم وضع كمية صغيرة منها على قرص كوارتز وتوزيعها في طبقة رقيقة باستخدام قضيب زجاجي، مع الضغط عليها بقوة

A- العينات الموشورية المحضرة
للاختبارات الفيزيائية



B- العينات الأسطوانية المحضرة
لاختبار النفاذية



C- العينات المحضرة للاختبارات
المعدنية والمجهرية



الشكل (4): عينات مادة القضاض من قلعة صيرة، المحضرة للاختبارات المعملية

الجدول (1): ملخص الاختبارات والمعايير والمعدات وعدد العينات المستخدمة في توصيف مادة القضاض من قلعة صيرة.

م	نوع الاختبار	المعيار المستخدم	رقم المرجع	الجهاز المستخدمة	شكل العينات	عدد العينات
1	الكثافة الظاهرية	EN 1015-10:1999	[17]	فرن تجفيف حراري، ميزان تحليلي إلكتروني، ميزان هيدروستاتيكي.	موشورية	6
2	المسامية المفتوحة	EN 1936:2006	[18]	فرن تجفيف حراري، ميزان تحليلي إلكتروني، ميزان هيدروستاتيكي.	موشورية	6
3	امتصاص الماء	EN 1936:2006	[18,19]	فرن تجفيف حراري، ميزان تحليلي إلكتروني، حوض ماء.	موشورية	6
4	الامتصاص الشعري	EN 13755:2008	[20]	فرن تجفيف حراري، ميزان تحليلي إلكتروني، أوعية غمر، عداد توقيت.	موشورية	6
5	معامل النفاذية	EN 1015-18:2002	[21-23]	جهاز النفاذية بطريقة الرأس الساقط (مقياس نفاذية الرأس الساقط)	أسطوانية	3
6	تحليل المعدني (XRD)	EN ISO 17892-11. ASTM D5856	[14,16,24]	جهاز حيود الأشعة السينية (Bruker D8) (DISCOVER	مسحوق القضاض	1
7	التحليل الكيميائي (XRF)	ASTM E3294.	[25-27]	جهاز التحليل الطيفي بالأشعة السينية (PANalytical Axios Advanced)	مسحوق القضاض	1
8	التحليل المجهرية (SEM-EDS)	قاعدة بيانات ICDD PDF	[28-30]	مجهر إلكتروني ماسح (FEI Quanta) (FEG 250 EDS مزود بنظام	مسحوق القضاض	5

1	مسحوق القضاض	مجموعة مناخل قياسية، جهاز هزاز، ميزان	[12]	ASTM D5381	التحليل المنخلي للكام	9
1	(شرائح رقيقة)	مجهر ضوئي (Zeiss) مزود ببرنامج تحليل الصور Zeiss Microscopy GmbH	[13]	ASTM E112	التحليل بالمجهر الضوئي	10

العناصر الكيميائية الأساسية والثانوية الموجودة داخل البنية المجهرية لمادة للقضاض، ورسم خرائط لتوزيعها على السطح، وذلك من خلال توجيه شعاع الإلكترونات من المجهر إلى منطقة محددة على سطح العينة؛ مما يؤدي إلى انبعاث أشعة سينية مميزة لكل عنصر، وتم تسجيل طيف هذه الأشعة عن طريق الكاشف المدمج (Apex Integrated System) في المجهر الإلكتروني، وبالتالي يقوم برنامج النظام بتحليل هذا الطيف، وتحديد التركيب العنصري الذي ينتج بيانات كمية حول التركيب العنصري المحدد في مواقع مجهرية، وكذلك يقوم بإنشاء خرائط توزيع لهذه العناصر.

وقد تم إجراء 5 عينات في اختبار تحليل الطاقة المشتتة بالأشعة السينية (SEM-EDX)، وأخذ المتوسط الحسابي، وإهمال القيم التي شذت بقيمة أكبر من ضعف التباين.

3. النتائج والمناقشة:

أظهر الفحص البصري الأولي لمادة القضاض من قلعة صيرة، أنها تتميز بلون بيج فاتح، وتتخلله حبيبات: رمادية وسوداء، كما لوحظ أن المقطع العرضي يتكون من ركام متنوع الأحجام، وهو موزع بانتظام داخل مادة رابطة متماسكة وفاتحة اللون.

وقد سجل الطيف الناتج عن هذا الانبعاث وتحليله باستخدام البرنامج الخاص بجهاز (PANalytical Axios Advanced)، حيث تم تحديد العناصر، وحساب تركيزها بدقة، مع التعبير عن النتائج النهائية كنسب وزنية للأكاسيد، وتكمن الفائدة النهائية من هذا الاختبار في توفير التركيب الكيميائي الشامل للأكاسيد القضاض. اكتفي بعينة واحدة لكل من اختبري (XRD و XRF) نظراً لطبيعتهما الوصفية.

وتم إجراء الاختبارات المجهرية، بواسطة المسح المجهر الإلكتروني (SEM)؛ لتوصيف البنية السطحية الدقيقة والمورفولوجية لمادة القضاض، حيث نُظِّفَت العينات، وتم تجفيفها وتثبيتها على قاعدة معدنية، ثم تغليفها بطبقة رقيقة من الذهب والبلاديوم؛ لمنع تراكم الشحنات الكهربائية في أثناء الفحص، وبعد ذلك، تم التقاط صورة العينات باستخدام مجهر (FEI Quanta FEG 250)؛ لالتقاط صور رقمية عالية الدقة عند ثلاث مستويات مختلفة (5، 40، و 200 ميكرون)، للحصول على تصور شامل للبنية على مقاييس متعددة، وتم تحليل هذه الصور الملتقطة باستخدام برنامج (ImageJ). الذي أتاح إجراء تحليل كمي للسماط المورفولوجية، ويوفر هذا التحليل بيانات كمية دقيقة عن البنية المجهرية، بما في ذلك توزيع حجم الحبيبات، وخصائصها الشكلية، بالإضافة إلى توصيف شبكة المسام. وقد تم إجراء تحليل الطاقة المشتتة للأشعة السينية (SEM-EDX)، بالتزامن مع الفحص المجهر الإلكتروني (SEM)؛ لتحديد



3.1. الخصائص الفيزيائية والهيدروليكية:

لخصت الخصائص الفيزيائية والهيدروليكية الرئيسية لعينة القضاض في (جدول 2)، وقد أبرزت النتائج كثافة ظاهرية مرتفعة، وقيماً منخفضة جداً للمسامية المفتوحة والنفاذية؛ مما يشير إلى بنية مادية متراصة وغير منفذة.

ويوضح (جدول 2) نتائج الخصائص الفيزيائية والهيدروليكية لمادة القضاض من قلعة صيرة، وقد أظهرت كثافة ظاهرية بقيمة 1740 كجم/م³، وتقع هذه القيم ضمن النطاق المذكور في الأدبيات العلمية للملاط الجيري التقليدية القائمة على الجير والبوز ولانا، والذي يتراوح بين (1600-1850 كجم/م³) [9,31-35]، ويؤكد هذا التوافق أن مادة القضاض المدروسة تتشابه في خصائصها مع المواد التاريخية التقليدية المستخدمة في العمارة التراثية في الحضارات القديمة حول العالم، ويتفوق بدرجة بسيطة على خصائص القضاض في صهاريج عدن [11].

جدول (2): الخصائص الفيزيائية والهيدروليكية لعينة القضاض من قلعة صيرة

الامتصاص الشعري	معامل النفاذية	امتصاص الماء	المسامية المفتوحة	الكثافة الظاهرية
Cs (10-100 min) (Kg/m ² * s ^{0.5})	K (m/s)	W _a (%)	P _n (%)	ρ _b (Kg/m ³)
0.0267 ±0.003	6.55×10 ⁻⁹ ±10 ⁻⁹	11.27 ±1.1	19.61 ±1.2	1,740 ±100

سجلت المسامية المفتوحة قيمة 19.61%، وهي أقل من القيم المذكورة في الأدبيات العلمية للملاط الجيري التقليدي 25.7-38% [6,31,32]، ويعكس هذا الانخفاض وجود بنية داخلية متداخلة وشبكة مسامية دقيقة مغلقة نسبياً، وهي تمنح القضاض قدرة عالية على مقاومة نفاذ الماء والمحافظة على تماسكه في البيئات الرطبة.

أما امتصاص الماء فبلغ 11.27%، وهو ضمن نطاق الملاط الجيرية التقليدية 9.9-14.3% [6,31,35]؛ ما يدل على قدرة معتدلة على امتصاص الماء السطحي وتوازن جيد بين التبادل الرطوبي ومنع التشبع الكامل، وهي خاصية مثالية للمواد العازلة في المنشآت الساحلية.

بينما سجلت قيمة معامل الامتصاص الشعري 0.0267 كجم/م² × 10⁻⁵. وتتفق هذه النتائج مع الدراسات السابقة [31,35]، بعد 10 دقائق من الامتصاص الذي قيس للملاط الجيري التاريخي (ملاط الجير) في كنيسة أودا (Odda's Chapel) ضمن المدى المنخفض (0.0187-0.079 كجم/م² × 10⁻⁵) [31]. وبمقارنتها بنتائج دراسة [31,32]، فإن المدى العام للملاط الجيري في تلك الدراسة كان بين (0.15-0.2 كجم/م² × 10⁻⁵)، وهي قيم أعلى بنحو 10 مرات من نتائج هذا البحث .

وقد أبرزت قيمة منخفضة جداً لمعامل النفاذية الماء خلال 24 ساعة لمادة القضاض من قلعة صيرة كما يوضحه (جدول 2)، حيث سجلت قيمة 6.55×10⁻⁹ م/ث. وبمقارنة قيم نفاذية القضاض مع القيم الواردة في المراجع [21]، والواقعة ضمن نطاق النفاذية المنخفضة جداً حسب تصنيف هولتينغ (Hörling) الذي يتراوح بين (10⁻¹⁰ > K ≥ 10⁻⁸) م/ث [34]، نجد أن النفاذية في المرجع تبلغ حوالي 10 أضعاف نفاذية القضاض اليمني، بالإضافة إلى أن قيمته أقل بثلاث مرات من قيمة معامل النفاذية للقضاض في صهاريج عدن [11]؛ مما يؤكد مهارة البنائين اليمنيين منذ قديم الأزل الناتجة عن تراكم الخبرة.

ويوضح (الشكل 5) التوزيع الحبيبي لركام القضاض، بينما يوضح (الشكل 6) التحليل الحبيبي للمادة الرابطة للقضاض عن طريق التصوير المجهر، بينما يوضح الشكل (الشكل 7) صور المجهر الضوئي لعينة القضاض بتكبير 100 مرة.

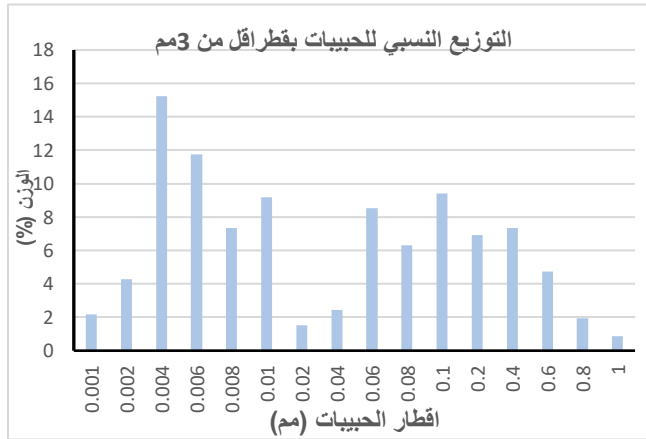
ومن (الشكل 5)، نلاحظ أن الركام تركز بنسبة 75% من المحجوز عند قطر 28م، وبالتالي فإن كبر حجم الركام يؤدي إلى ارتفاع الكثافة الظاهرية للمادة، بينما يوضح (الشكل 6) أن

امتصاص الماء، وأيضاً يؤكد التوزيع المنتظم لأحجام حبيبات المادة الرابطة على أنه يؤدي إلى تداخل الحبيبات، وبالتالي يؤدي زيادة في الكثافة، والتقليل في النفاذية.

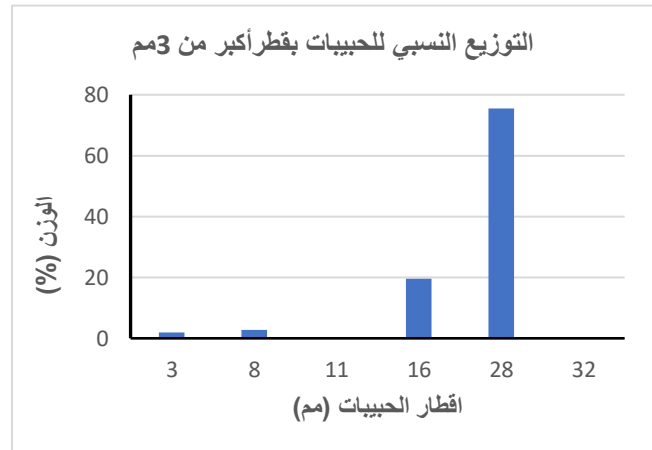
وبصفة عامة، تُظهر نتائج عينة قضاض قلعة صيرة خصائص فيزيائية متميزة، وهي تتمثل في كثافة مرتفعة، وقيم منخفضة لكل من المسامية المفتوحة والامتصاص المائي والنفاذية؛ مما يدل على بنية مدمجة متماسكة تُسهم في تعزيز مقاومة المادة لتسرب الماء.

حبيبات المادة الرابطة متوزعة على معظم الأقطار، ونجد أن تركيزها جاء بنسبة 13% من المحجوز عند أقطار صغيرة 0.004-0.006 مم، وقد توزعت بقيم أقل من 5% من القطر 1 مم حتى 0.02 مم.

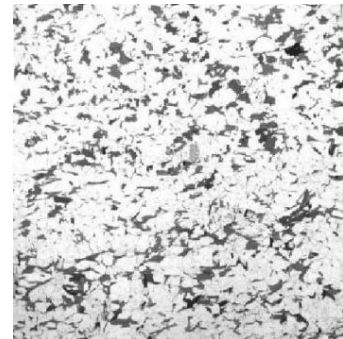
وبناءً على تحليل نتائج الاختبارات الفيزيائية والهيدروليكية لعينة القضاض، يتضح أن قيمة الكثافة العالية تتناسب عكسياً مع قيم كل من الامتصاص المائي والمسامية والنفاذية المنخفضة، وهو ما يتوافق مع ما أشار إليه المرجع [6]، الذي أوضح أن زيادة الكثافة يرتبط عادةً بانخفاض النفاذية والمسامية وقدرة المادة على



الشكل 6: التوزيع الحجمي لحبيبات المادة الرابطة لعينة القضاض من قلعة صيرة باستخدام المجهر الضوئي



الشكل 5: التوزيع الحجمي لحبيبات الركام في مادة القضاض من قلعة صيرة.



الشكل 7: صور المجهر الضوئي لعينة القضاض من قلعة صيرة عند تكبيرها 100×.

كما تم تحديد وجود الميكروكلين (KAlSi_3O_8) بنسبة 18.6%، والألبايت ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) بنسبة 16.9%، وكلاهما ينتمي إلى مجموعة الفلسبارات، ويعدان من المعادن التي تسهم في التفاعلات الهيدروليكية، مثل مركب (C-A-H) و (C-S-H) [6,10]، مما يعكس الطابع الهيدروليكي العالي للقضاض، كما وجد الكوارتز (SiO_2) بنسبة 10.2%، والذي يعد مصدراً مهماً للسيليكا، ويسهم في تحسين الكثافة ودعم عملية الكربنة،

وبنسبة ضئيلة، تم الكشف عن الهيماتيت (Fe_2O_3) بنسبة 2.3%، وهو من المعادن المستقرة التي تعمل على تسريع التصلب، وتقليل المسامية والامتصاص [5,36]. وتتشابه نسب المكونات للقضاض اليميني بنتائج مكونات الجير المطفأ المستخدم في حضارة الروم [5,37]، حيث تم الكشف عن وجود معادن مشابهة مثل الكالسيت، والكوارتز، والبلاجيوكلاز، والفلسبارات، والمسكوفيت، والبلاجيوجلاز، كما أظهرت دراسة [33] وجود معادن مثل المغنتيت، والهيماتيت، والكالسيت، واليورتلانديت. وفي دراسة أخرى [38]، تم استكشاف الجبس والكوارتز والفلسبارات والكالسيت. بينما أكدت دراسة [9]، وجود الكوارتز، والفلسبار، والبيوتيت، والميكا، والبلاجيوكلاز، والمسكوفيت. وبشكل عام نجد أن الكالسيت والكوارتز والفلسبارات تعد من المكونات الأساسية في المواد الجيرية، بالإضافة إلى خلو القضاض من الشوائب الضارة التي قد تؤثر سلباً على خصائصه،

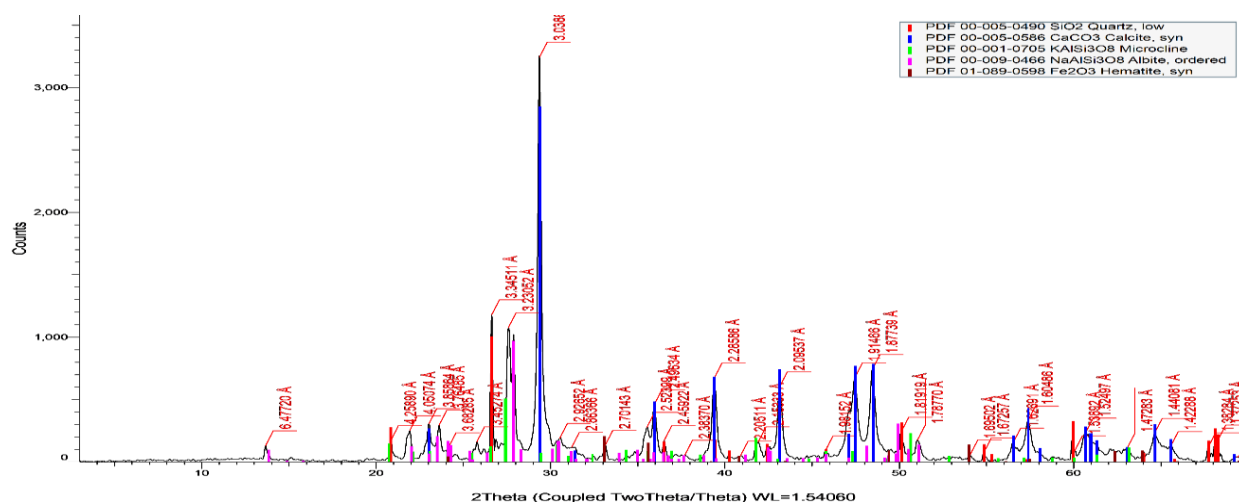
الجدول (3): نتائج تحليل حيود للأشعة السينية (XRD) لعينة القضاض من قلعة صيرة

النسبة الوزنية (%)	الصيغة الكيميائية	المركب المعدني
10.2	SiO_2	Quartz, low
52.1	CaCO_3	Calcite, syn
18.6	KAlSi_3O_8	Microcline
16.9	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Albite, ordered
2.3	Fe_2O_3	Hematite, syn

3.2. تحليل حيود بالأشعة السينية (XRD)

يوضح (الشكل 8)، العلاقة بين زاوية الحيود (2θ) وشدة الإشارة (Intensity) لجميع القمم (Peak Picking) الناتجة عن تحليل حيود الأشعة السينية (XRD) لمادة القضاض من قلعة صيرة، كمأتم تلخيص نتائج التحليل في (جدول 3)، حيث تم تحديد التركيب المعدني على شكل نسب وزنية.

يبين (الجدول 3)، أن المعدن الرئيسي للقضاض هو الكالسيت (Ca CO_3) بنسبة 52.1%، مما يؤكد على طبيعته الجيرية،



الشكل 8: مخطط حيود للأشعة السينية لعينة القضاض من قلعة صيرة يوضح العلاقة بين زاوية الحيود (2θ) وشدة الذروة.

المرتبط كيميائياً من المعادن الطينية والمواد المتحللة اثنا عملية التسخين، ومن ثم فإن نسبة متوسط الخسارة للوزن عند التسخين، 16.8%، مما يشير إلى توازن بين الكربونات والسيليكات الهيدروليكية.

وتتشابه نسب المكونات للقضاض اليمني بنتائج مكونات الجير المطفا المستخدم في حضارة الروم [5-7,36,39]. كما تتقارب هذه النتائج بشكل كبير مع نتائج القضاض المستخدم في صهاريج عدن [11]، وتخلفت عنها بوجود شوائب تضعف خصائصها كما تم توضيحه في القسم (3.2).

ومن أبرز ما يميز قضاض قلعة صيرة هو احتوائه على نسبة عالية من المكونات الهيدروليكية ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) حيث بلغت مجموع نسبها (36.57 + 8.95 + 6.11 = 51.63%)، وتعتبر هذه النسب عالية جداً، إذ تقدر بضعف نسبة أكسيد الكالسيوم (CaO) المتوفرة في العينة، يعد هذا التركيب الكيميائي مثالياً لتحفيز تفاعلات البوزولانا وتكوين أطوار هيدرات سيليكات الكالسيوم (C-S-H)، وهيدرات الومينات الكالسيوم (C-A-H)، كما أشارت الدراسات [2,5,10]، وقد قام الباحث (Taylor and Eckel) بتحديد معامل التوصيل الهيدروليكي (IH)، ومعامل التثبيت الإسمتي (CI)، وذلك من خلال المعادلتين (3) و(4) [36,37].

$$(HI) = \frac{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + SiO_2}{CaO + Mgo} \quad eq(3)$$

$$(CI) = \frac{1.1Al_2O_3 + 0.7Fe_2O_3 + 2.8SiO_2}{CaO + 1.4Mgo} \quad eq(4)$$

Hydraulic Classification (Taylor [37])

$0.30 < HI < 0.50 \rightarrow$ Weakly hydraulic

$0.50 < HI < 0.70 \rightarrow$ Moderately hydraulic

$HI > 0.70 \rightarrow$ Strongly hydraulic

Cementation Classification (Eckel [36]):

$CI < 0.15 \rightarrow$ Air lime (non-hydraulic)

$0.15 < CI < 0.30 \rightarrow$ Sub-hydraulic lime

ويعكس ذلك مستوى متقدم من الخبرة لدى البنائين اليمنيين في اختيار المواد وتحضيرها، كما تتوافق هذه النتائج بشكل كبير مع نتائج القضاض المستخدم في صهاريج عدن [11].

3.3. التحليل الطيفي بالأشعة السينية (XRF)

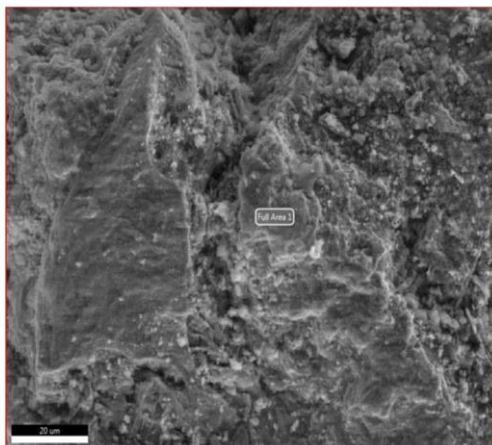
يوضح (جدول 4) نتائج التحليل الكيميائي لأكاسيد القضاض باستخدام تقنية طيف الأشعة السينية الفلورية (XRF)، معبراً عنها بالنسبة الوزنية. وتظهر النتائج أن السيليكات (SiO_2) المكون الرئيسي في عينة القضاض من قلعة صيرة بنسبة 36.57%، يليه أكسيد الكالسيوم (CaO) بنسبة 23.10%، ما يشير إلى زيادة واضحة للسيليكات (كالرمل) مقارنة بالجير التقليدي، وشملت المكونات الثانوية كلاً من أكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) بنسبة 8.95%، وأكسيد الحديد (Fe_2O_3) بنسبة 6.11%، وأكسيد الصوديوم (Na_2O) بنسبة 3.46%، وأكسيد البوتاسيوم (K_2O) بنسبة 2.27%، وهي نسب تدل على وجود شوائب قلوية ومعادن طينية.

الجدول (4): التركيب الكيميائي للأكاسيد لعينة القضاض من قلعة صيرة

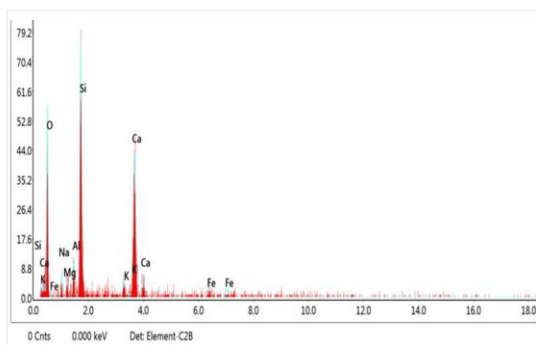
باستخدام تقنية XRF	
المحتوى (%)	الصيغة الكيميائية
23.10	CaO
36.57	SiO ₂
8.95	Al ₂ O ₃
6.11	Fe ₂ O ₃
3.46	Na ₂ O
0.81	MgO
2.27	K ₂ O
0.67	TiO ₂
0.27	SO ₃
0.19	P ₂ O ₅
0.20	MnO
0.18	Cl ₂
0.43	SrO, ZrO, BaO, Co ₃ O ₄ , Rb ₂ O, ZnO, Cr ₂ O ₃ , Nb ₂ O ₅
16.80	L.O.I

وقد بلغت قيمة الفقد عند الاشتعال (L.O.I) نحو 16.80%، ما يعكس وجود محتوى متوسط من الكربونات أو الرطوبة المحتجزة. وتمثل هذه القيمة فقدان ثاني أكسيد الكربون (CO_2) الناتج عن تحلل الكربونات، بالإضافة إلى فقدان الماء (H_2O)

Area 1



صورة مجهر إلكتروني ماسح (SEM) – المنطقة 1.



الشكل 9: صور المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) والطيف التحليلي (EDS) لعينة القضاض من قلعة صيرة

وتشير نتائج (SEM-EDS) إلى زيادة عنصري الأوكسجين (O) والكالسيوم (Ca) في العينة، بنسبة 54.45% و 23.81% على التوالي، في حين بلغت نسبة السيليكون (Si) 11.52%. كما تم الكشف عن عناصر أخرى بنسب أقل وهي: الصوديوم (Na) بنسبة 2.86%، والالومنيوم (Al) بنسبة 2.30%، والمغنيسيوم (Mg) بنسبة 1.9%، والحديد (Fe) بنسبة 1.43%، والبوتاسيوم (K) بنسبة 0.97%، والكلور (Cl) بنسبة 0.54%، والكبريت (S) بنسبة 0.39%. وقد أظهرت نتائج (SEM-EDS) اتفاق مع ما ورد في الأدبيات العلمية المتعلقة بتحليل الملاط الجيري التاريخي،

$0.30 < CI < 0.50 \rightarrow$ Weakly hydraulic

$0.50 < CI < 0.70 \rightarrow$ Moderately hydraulic

$CI > 0.70 \rightarrow$ Eminently hydraulic (increasing with index value)

وبناء على هذه المعادلات السابقة، فإن قيمة مؤشر الهيدروليك (HI) لقضاض قلعة صيرة هي 2.16، وقيمة مؤشر التماسك هو 4.87، وهي قيم تشير إلى سلوك عالي الهيدروليكية، مما يدل على كفاءة عالية في العزل المائي، كما تؤكد هذه النتائج أن التركيب مثالي لتكوين أطوار هيدرات سيليكات الكالسيوم (C-S-H)، وهيدرات ألومينات الكالسيوم (C-A-H)، وتعد قيمة (HI) في هذه الدراسة 2.16 مرتفعة مقارنة بـ 0.8-1.2 في الدراسات السابقة [6,10,11].

3.4. التحليل العنصري باستخدام (SEM-EDS)

يوضح (الشكل 9) صور المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) والتحليل العنصري الكمي والطيفي للعناصر الكيميائية باستخدام تقنية (SEM-EDS)، بينما تم تلخيص نتائج التحليل العنصري في (جدول 5)، الذي يبين النسب الوزنية للعناصر المكونة لعينة القضاض من قلعة صيرة.

الجدول (5): نتائج التحليل الكمي للعناصر باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح وتقنية الطاقة المشتتة للأشعة السينية (SEM-EDS)

العنصر	النسب الوزنية (%)
O	54.45
Ca	23.81
Si	11.52
Na	2.86
Al	2.3
S	0.39
Mg	1.9
Fe	1.43
Cl	0.54
K	0.97

من الصور ليست متصلة. وبتحليل متوسط حجم الفراغات نجد اتساقاً في نسب المسامية عند مستويات التكبير الثلاثة (بين 11.8% و 14.63%)، مع تزايد واضح في متوسط حجم الفراغات ليصل إلى 7.45 ميكرون عند 200 ميكرون. وبشكل عام تُظهر العينة ترابطاً بلورياً بشكل جيد جداً، بالإضافة إلى توزيع معدني منتظم.

وعند تكبير منخفض 200 ميكرون أمكن تحليل البنية الكلية وتوزيع حجم الركام على نطاق واسع. وقد أظهرت العينة توزيعاً متدرجاً إلى حد ما للركام بقطر (10-30 مايكرومتر) مع وجود ركام بأحجام كبيرة بشكل نادر، بالإضافة إلى وجود مسامات بقطر 50 مايكرومتر، كما نجد بنية كثيفة بسبب تلبد كثيف للركام والمسامات بهلام (C-S-H) و (C-A-H)؛ مما يعيق تمييز حدود حبيبات الركام. وعند تكبير متوسط 40 ميكرون، أمكن تحديد مورفولوجيا الركام، وكذلك تحديد حبيبات المادة الرابطة. وأظهرت العينة شبكة كثيفة مُلبدة بهلاميات (C-S-H) و (C-A-H)، للركام والمادة الرابطة. وعلى الرغم من أن أوجه البلورات كانت لا تزال مرئية، فإنها كانت مخفية أسفل الهلام، وعند تكبير عالٍ 5 ميكرون، تم فحص السمات النانوية لمكونات المادة الرابطة، وكان للعينة تركيزاً عالياً لهلام الهيدرات (C-S-H و C-A-H)، وتغلف حبيبات المادة الرابطة أيضاً؛ مما يُشير إلى انتظام توزيع هلام الهيدرات على حبيبات الركام، وكذلك إلى المادة الرابطة بشكل ممتاز.

وبشكل عام أكدت نتائج اختبارات XRD، XRF، SEM-EDS أن المادة الرابطة للقضاض هو الكالسيوم، كما أكدت الاختبارات أيضاً تكون هيدرات سيليكات الكالسيوم (C-S-H)، وهيدرات ألومينات الكالسيوم (C-A-H) بشكل قاطع، وذلك من خلال قيمة مؤشر الهيدروليك (HI)، وقيمة مؤشر التماسك (IC)، بالإضافة إلى (الشكل 9)، حيث يعمل هلام الهيدرات على تقليل حجم المسامات الكبيرة، كما يؤدي إلى إغلاق المسامات الصغيرة؛ مما يجعل المسامات الكبيرة غير متصلة، وهذا يفسر بشكل واضح

لأسيما في النسب المرتفعة لكل من الكالسيوم (Ca)، والأوكسجين (O)، والتي تُعد من السمات المميزة للملاط الكلسي التقليدي، وقد أُشير إلى ذلك في دراسة [5] حول ملاط معبد في دراستهم عن ملاط معبد Zejtun، بالإضافة إلى الدراسات [37,39,40]. ويعزى ارتفاع نسبة الأكسجين (O) إلى كونه أساسياً في تركيب الهيدروكسيدات والمعادن السيليكاتية. كما يشير ارتفاع نسبة الكالسيوم (Ca) إلى أن الكالسيوم هو العنصر الرئيس في الجير المستخدم كمادة رابطة. وتم تحليل نسبة الكالسيوم إلى السيليكون (Ca/Si=2.07)، ونسبة الكالسيوم إلى مجموع السيليكون والألومنيوم (Ca/(Si+Al)=1.72)، حيث تقع هذه القيم ضمن النطاق المناسب لتكوين أطوار هيدرات سيليكات الكالسيوم وهيدرات ألومينو سيليكات الكالسيوم (C-S-H/C-A-H)، و التي تتشكل نتيجة التفاعل اليوزولاني بين هيدروكسيد الكالسيوم (Ca (OH)₂)، و ثاني أكسيد السيليكون (SiO₂)، وأكسيد الألومنيوم (Al₂O₃)، مما يؤكد حدوث التفاعل البوزولاني بوضوح، وتشير هذه النتائج إلى أن العينة لا تمثل مجرد حجر جيري مطفاً، بل يمكن تصنيفها كمادة جيرية هيدروليكية ذات طبيعة بوزولانية، أو مزيج يغلب عليه الطابع الهيدروليكي البوزولاني. ويؤكد وجود السيليكون والألومينات إلى وجود شوائب طينية في الحجر الجيري الأصلي، أو إلى إضافة مصدر السيليكون والومينات الموجود في الرماد البركاني عند تحضير القضاض. وأخيراً، فإن انخفاض نسبة الكبريت (S) والكلور (Cl) يسهم في تحسين خصائص العينة، نظراً لتقليل التأثيرات السلبية لهذه العناصر على الاستقرار الكيميائي.

3.5. تحليل المجهر الإلكتروني الماسح (SEM)

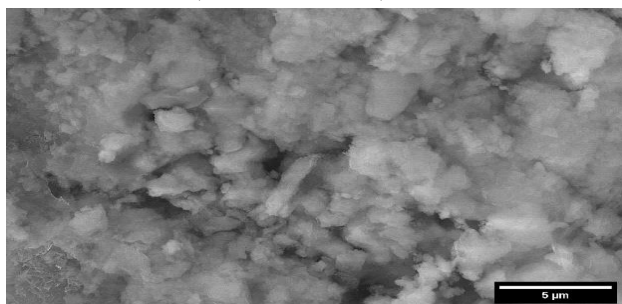
يوضح (الشكل 10) صور المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) لعينة القضاض من قلعة صيرة، والتي فحصت على ثلاثة مستويات تكبير مختلفة: (5 ميكرونات، 40 ميكرونات، 200 ميكرون). ونلاحظ أن قيم المسامية من تحليل الصور مختلفة عن قيمة المسامية المستتجة من التجارب؛ مما يدل على أن الفراغات

هو موضح في التوزيع الحبيبي للركام والمادة الرابطة كما في (الشكل 4)، و(الشكل 5).

ولا يُثبت تحليل (XRD) وجود طور الهلاميات (C-S-H) أو (C-A-H) بشكل مباشر؛ إذ إن هذه الأطوار تكون عادة غير متبلورة للأشعة السينية، لكن المحتوى المرتفع من SiO_2 و Al_2O_3 و CaO في التحليل الكيميائي (XRF)، إلى جانب قيم

القيمة الكبيرة للكثافة، وتقليل المسامية والامتصاص الشعري؛ مما يؤدي إلى انخفاض قيمة النفاذية كما في (جدول 2) بشكل مميز، ويجعلها من أفضل المواد المستخدمة كعازل للماء.

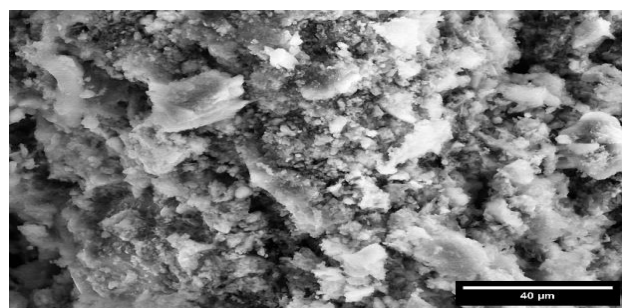
وكذلك أكدت صور المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) كما في (الشكل 9) التداخل الممتاز لحبيبات الركام والمادة الرابطة، كما



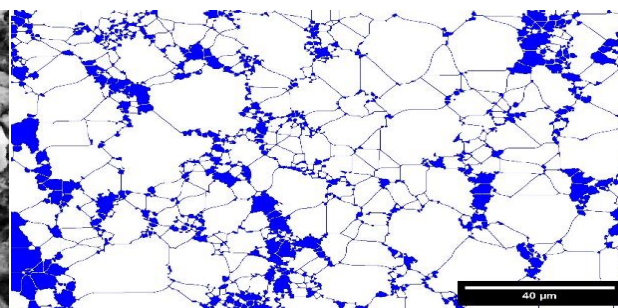
صور المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) عند تكبير 5 ميكرومتر



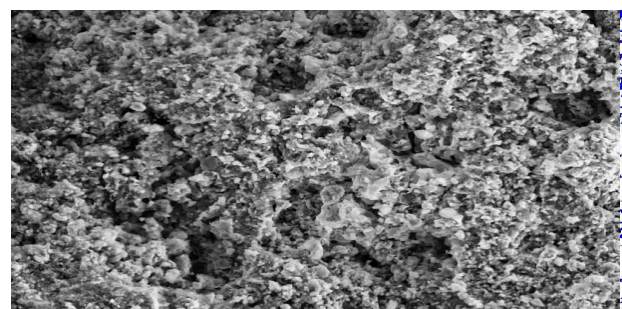
نتائج تحليل برنامج (ImageJ)، لصور المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) عند تكبير 5 ميكرومتر .



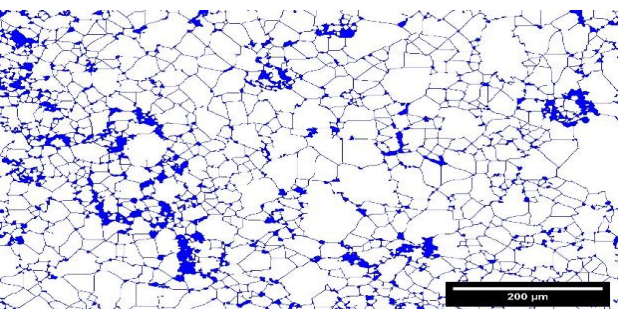
صور المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) عند تكبير 40 ميكرومتر .



نتائج تحليل برنامج (ImageJ)، لصور المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) عند تكبير 40 ميكرومتر .



صور المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) عند تكبير 200 ميكرومتر .



نتائج تحليل برنامج (ImageJ)، لصور المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) عند تكبير 200 ميكرومتر .

الشكل 10: صور المجهر الإلكتروني الماسح وصور التحليل لعينة القضااض من قلعة صيرة عند تكبيرات مختلفة (5 ميكرومتر، 40 ميكرومتر، 200 ميكرومتر)

التركيب المعدني والكيميائي: أظهر تحليل XRD أن الكالسيت (CaCO_3) هو المكون المعدني الرئيس بنسبة 53%، يليه الميكروكلين (KAlSi_3O_8) بنسبة 18.6%، والألبيت ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) بنسبة 16.9%، والكوارتز (SiO_2) 10.2%، والهيماتيت (Fe_2O_3) بنسبة 2.3%. كما بيّن تحليل XRF أن السيليكا (SiO_2) هي الأكسيد الرئيسي بنسبة 36.57%، يليه أكسيد الكالسيوم (CaO) بنسبة 23.10%، بالإضافة إلى أكاسيد الألومنيوم والحديد بنسب تقل عن 10%.

دليل على التفاعل البوزولاني: أكدت نتائج تحليل (XRF) و (SEM-EDS)، تكون نواتج التفاعل البوزولاني المتمثلة في هيدرات سيليكات الكالسيوم (C-S-H)، وهيدرات ألومينات الكالسيوم (C-A-H) داخل المسامات؛ مما يؤدي إلى إغلاق المسامات الدقيقة، وتعطيل اتصالية المسامات الكبيرة، وبالتالي انخفاض النفاذية وتعزيز خصائص العزل المائي.

استدامة الأداء طويل الأمد: يُعد استمرار عمل الخزانات والصهاريج القديمة المطلية بالقضاض دليلاً عملياً على متانته الاستثنائية وفعاليته في العزل المائي على مدى قرون.

5. التوصيات:

التوصيات العلمية والتطبيقية التالية، والتي تهدف إلى توجيه عمليات إنتاج وتطبيق هذه المادة بما يضمن تحقيق أعلى مستويات الجودة والمتانة، مع الحفاظ على خصائصها التراثية المميزة:

أولاً: المواصفات الفنية المستهدفة للقضاض كمادة عازلة

للماء، يُوصى بأن تستوفي مادة القضاض المنتجة المواصفات الفنية التالية لضمان أدائها العازل الفائق:

الكثافة الظاهرية: يُفضل أن تتراوح بين 1730-1750 كجم/م³، إذ تمثل هذه القيمة التوازن الأمثل بين تحقيق تراص عالٍ للحبيبات، والإبقاء على مسامية محدودة تسمح بعمليات الكربنة الطبيعية الضرورية لتصلب المادة.

المؤشرات الهيدروليكية ($\text{HI} = 2.16$, $\text{CI} = 4.87$) التي تصنف المادة على أنها شديدة الهيدروليكية، يشير بقوة إلى حدوث تفاعلات هيدروليكية، كما تظهر صور المجهر الإلكتروني (SEM) بنية كثيفة متجانسة تغلف حبيبات الركام، مع نسب عنصرية ($\text{Ca/Si} \approx 2.07$)، وهي تطابق ما هو معروف لهلاميات (C-S-H)، هذه الأدلة المجهرية والكيميائية تتوافق مع تكوّن أطوار هيدروليكية غير متبلورة تسد المسامات، وتسهم في الأداء العالي للعزل المائي، كما يفسر المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) كما في (شكل 9) التركيبة الهلامية (غير المتبلورة) الهيدرات عدم مقدرة اختبار (XRD) تحديدها، حيث إن اختبار (XRD) كما في (جدول 3) يتعرف فقط على المكونات البلورية (وليس على الهلام)، وبالتالي فإن اختبار (XRF) و (SEM) هما الاختباران اللذان يستطيعان تأكيد وجود هيدرات ألومينات الكالسيوم (C-A-H)، وهيدرات سيليكات الكالسيوم (C-S-H) بشكل موثّق.

4. الاستنتاجات:

قدّمت هذه الدراسة توثيقاً علمياً دقيقاً لمكونات مادة القضاض التقليدية العازلة للماء، والمأخوذة من قلعة صيرة بعدن، وذلك باستخدام تقنيات متطورة شملت الاختبارات الفيزيائية والهيدروليكية، والتحليل المعدني (XRD, XRF)، والتحليل المجهر (SEM-EDS)، والتحليل المورفومتري. وتُظهر النتائج ما يلي:

أداء فيزيائي وهيدروليكي استثنائي: تميزت عينات القضاض بكثافة حجمية مرتفعة 1740 كجم/م³، وانخفاض ملحوظ في المسامية المفتوحة 19.61%، وامتصاص الماء بالغمر 11.27%، بالإضافة إلى معامل امتصاص شعيري متدنٍ 0.0267 كجم/م² × ث^{0.5}، ونفاذية منخفضة للغاية 9- 6.55×10^{-9} م/ث، وتؤكد هذه المؤشرات مجتمعة كفاءة القضاض العالية كمادة عازلة للماء.



6. المراجع:

- [1] S. Al-Radi, Qudad, the Traditional Yemeni Plaster, Yemen Update 34 (1994) 6–12.
- [2] C. Weiss, I. Gerlach, Qadhat—a Comparative Study of Ancient and New Lime Mortar from the Marib Province/Yemen, Archaeological and Anthropological Sciences 1 (2009) 87–94.
- [3] M. Kulaib, A.M. AL-Jolahy, Back to Traditional Building Materials, Yemeni Engineer 6 (2006) 113–122.
- [4] D. M. Abed, J. M. Abed, Z. H. Al-Saffar, Review Article on the Use of Lime Mortar in Heritage Buildings, NTU-JET 2 (2023). <https://doi.org/10.56286/ntujet.v2i3.700>.
- [5] R. Fort, M.J. Varas-Muriel, D. Ergenç, J. Cassar, M. Anastasi, N.C. Vella, The Technology of Ancient Lime Mortars from the Żejtun Roman Villa (Malta), (2022). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1897250/v1>.
- [6] A. Solak, Experimental Investigation of Lime Mortar Used in Historical Buildings in Becin, Turkey, Ms 22 (2016) 105–112. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.22.1.9022>.
- [7] M. Shivakumar, T. Selvaraj, M.P. Dhassaih, Preparation and Characterization of Ancient Recipe of Organic Lime Putty-Evaluation for Its Suitability in Restoration of Padmanabhapuram Palace, India, Sci Rep 11 (2021) 13261. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91680-8>.
- [8] C. Zhao, Y. Zhang, C.-C. Wang, M. Hou, A. Li, Recent Progress in Instrumental Techniques for Architectural Heritage Materials, Heritage Science 7 (2019) 36. <https://doi.org/10.1186/s40494-019-0280-z>.
- [9] A. Gheris, New Dating Approach Based on the Petrographical, Mineralogical and Chemical Characterization of Ancient Lime Mortar: Case Study of the Archaeological Site of Hippo, Annaba City, Algeria, Herit Sci 11 (2023) 103. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-00942-3>.
- [10] A. Arizzi, G. Cultrone, Mortars and Plasters—How to Characterise Hydraulic Mortars, Archaeological and Anthropological Sciences 13 (2021) 144. <https://doi.org/10.1007/s12520-021-01404-2>.
- [11] S. Al-Gawi, M. Algorafi, M. Kulaib, A. Al-Nono, The Physical, Hydraulic, and Mineralogical Characterization Study of the Traditional Qadhad

المسامية المفتوحة: يُشترط ألا تزيد عن 20%، وذلك للحد من امتصاص الماء وتقليل مخاطر التدهور الناتج عن تأثير الأملاح أو دورات التجميد والذوبان.

الامتصاص بالماء بالغمر: يُفضل ألا يتجاوز 13%؛ لضمان مقاومة فائقة للرطوبة، ولا سيما في المنشآت المائية أو المناطق المعرضة للأمطار الغزيرة.

معامل النفاذية: يجب ألا يزيد عن 10^{-9} م⁷/ث؛ لضمان فعالية عالية في عزل المياه ومنع تسربها.

ثانياً: التركيب المعدني والكيميائي الأمثل:

يُوصى باعتماد تركيبة معدنية وكيميائية محددة تحاكي التركيبة التقليدية للقضاض العازل، وذلك على النحو الآتي:

التركيب المعدني: يُعد وجود الكالسيت (CaCO_3) بنسبة 53% ضرورياً لتحقيق التصلب الكربوني الفعال، بينما تسهم الفلسبارات (ميكروكلين وألبيت) بنسبة إجمالية 34% في دعم التفاعلات البوزولانية، وتكوين الأطوار المميّهة، مثل هيدرات سيليكات الكالسيوم (C-S-H)، وهيدرات ألومينات الكالسيوم (C-A-H)؛ مما يعزز القوة والترابط البنيوي. كما يُستحسن وجود الكوارتز (SiO_2) بنسبة 11%؛ لتقليل الفراغات غير التفاعلية، وتحسين التماسك، والهيمايت (Fe_2O_3) بنسبة 2%؛ لدوره في تحسين بعض الخواص الفيزيائية.

التركيب الكيميائي: يُوصى بأن تكون السيليكا (SiO_2) هي المكون الرئيسي بنسبة 37%؛ لتوفير القاعدة الأساسية للتفاعلات البوزولانية، يليها أكسيد الكالسيوم (CaO) بنسبة 24%؛ لتأمين العنصر اللازم لتشكيل الأطوار المميّهة دون زيادة الجير الحر. كما يُفضل أن تصل نسبة الألومينا (Al_2O_3) إلى 9%، مع نسب محدودة من أكاسيد الصوديوم (Na_2O)، والبوتاسيوم (K_2O) بنحو 4% و3% على التوالي، حيث تسهم هذه الأكاسيد مجتمعة في تعزيز التفاعلات الداخلية، وزيادة الكثافة، وتحسين الأداء الميكانيكي والعازلي للمادة.



- [24] ASTM E3294-23, Guide for Forensic Analysis of Geological Materials by Powder X-Ray Diffraction, (2022). <https://doi.org/10.1520/E3294-23>.
- [25] ASTM D5381-93, Guide for X-Ray Fluorescence (XRF) Spectroscopy of Pigments and Extenders, (2021). <https://doi.org/10.1520/D5381-93R21>.
- [26] ISO 12677:2011, Chemical Analysis of Refractory Products by X-Ray Fluorescence (XRF) — Fused Cast-Bead Method, (2011).
- [27] ASTM D6247-18, Test Method for Determination of Elemental Content of Polyolefins by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry, (2018). <https://doi.org/10.1520/D6247-18R24>.
- [28] ASTM F1372-93, Test Method for Scanning Electron Microscope (SEM) Analysis of Metallic Surface Condition for Gas Distribution System Components, (2012). <https://doi.org/10.1520/F1372-93R12>.
- [29] ASTM E2809-22, Guide for Using Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM/EDS) in Forensic Polymer Examinations, (2022). <https://doi.org/10.1520/E2809-22>.
- [30] EDAX Inc, APEX Integrated System Manual, EDAX Inc, Mahwah, NJ, USA, 2022.
- [31] A. Erkal, D. D'Ayala, Laboratory Testing of Non-Standard Original Historic Building Materials and Related Implications for Conservation, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 48 (2015) 15–28. <https://doi.org/10.1144/qjegh2013-078>.
- [32] F.G. Branco, M.D.L. Belgas, C. Mendes, L. Pereira, J.M. Ortega, Characterization of Fresh and Durability Properties of Different Lime Mortars for Being Used as Masonry Coatings in the Restoration of Ancient Constructions, Sustainability 13 (2021) 4909. <https://doi.org/10.3390/su13094909>.
- [33] C.M. Belfiore, G. Montalto, C. Finocchiaro, G. Cultrone, P. Mazzoleni, Durability Tests on Lime-Based Mortars from the Historic Built Heritage of Catania (Eastern Sicily, Italy): An Experimental Study, Journal of Building Engineering 80 (2023) 108137. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108137>.
- [34] F. Autiero, M. Ramesh, M. Azenha, M. Di Ludovico, A. Prota, P.B. Lourenço, Experimental Analysis of Lime Putty and Pozzolan-Based Mortar for Interventions in Archaeological Sites, Mater Struct 54 (2021) 148. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01746-2>.
- Material of the Cisterns of Aden, Journal of Science and Technology 30 (2025). <https://doi.org/10.20428/jst.v30i12.3436>.
- [12] ASTM C136/C136M, Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, (2014). https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-14.
- [13] ASTM E112-10, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, (2010).
- [14] Bruker AXS GmbH, D8 ADVANCE / D8 DISCOVER User Manual, Bruker AXS GmbH, Karlsruhe, Germany, 2010. <https://doi.org/DOC-M88-EXX153%2520V3>.
- [15] Bruker AXS GmbH, D8 DISCOVER User Manual, in: Bruker D8 Advance User Manual, Bruker AXS GmbH, Karlsruhe, Germany, 2021: pp. 96–196. www.bruker.com.
- [16] International Centre for Diffraction Data (ICDD), PDF-2 Database, (2023). <https://www.icdd.com>.
- [17] EN 1015-10:1999, Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 10: Determination of Dry Bulk Density of Hardened Mortar, (1999).
- [18] EN 1936:2006, Natural Stone Test Methods – Determination of Real Density and Apparent Density, and of Total and Open Porosity, (2006).
- [19] EN 13755:2008, Natural Stone Test Methods – Determination of Water Absorption at Atmospheric Pressure, (2008).
- [20] EN 1015-18, Methods of Test for Mortar for Masonry—Part 18: Determination of Water Absorption Coefficient Due to Capillary Action of Hardened Mortar, (2002).
- [21] S. Galvan, C. Pla, N. Cueto, J. Martínez-Martínez, M.A. García-del-Cura, D. Benavente, A Comparison of Experimental Methods for Measuring Water Permeability of Porous Building Rocks, Mater. Constr. 64 (2014) e028. <https://doi.org/10.3989/mc.2014.06213>.
- [22] EN ISO 17892-11, Geotechnical Investigation and Testing — Laboratory Testing of Soil — Part 11: Determination of Permeability by Constant and Falling Head, (2019).
- [23] ASTM D5856-15, Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter, (2015).



- [35] N. Wonganan, C. Athisakul, P. Mahasuwanchai, W. Tanchirapat, R. Sahamitmongkol, S. Leelataviwat, Ancient Materials and Substitution Materials Used in Thai Historical Masonry Structure Preservation, *Journal of Renewable Materials* 9 (2021) 179–204. <https://doi.org/10.32604/jrm.2021.013134>.
- [36] M. Lezzerini, S. Raneri, S. Pagnotta, S. Columbu, G. Gallelo, Archaeometric Study of Mortars from the Pisa's Cathedral Square (Italy), *Measurement* 126 (2018) 322–331. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.05.057>.
- [37] P. Maravelaki-Kalaitzaki, A. Bakolas, A. Moropoulou, Physico-Chemical Study of Cretan Ancient Mortars, *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 651–661. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01030-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01030-X).
- [38] R. Fort, D. Ergenç, N. Aly, M. Alvarez De Buergo, S. Hemeda, Implications of New Mineral Phases in the Isotopic Composition of Roman Lime Mortars at the Kom El-Dikka Archaeological Site in Egypt, *Construction and Building Materials* 268 (2021) 121085. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121085>
- [39] A. Manoharan, C. Umarani, Lime Mortar, a Boon to the Environment: Characterization Case Study and Overview, *Sustainability* 14 (2022) 6481. <https://doi.org/10.3390/su14116481>.
- [40] S.K. Singh, M.R. Singh, Characterization and Compositional Identification of Stepwell (Baoli) Lime Plasters from 16th Century Arab Ki Sarai, Delhi, *J Build Rehabil* 9 (2024) 77. <https://doi.org/10.1007/s41024-024-00427-1>.