Wadi Alshatti University Journal of
Pure and Applied Sciences

مجلة جامعة وادي الشاطئ
للعلوم البحتة والتطبيقية

Volume 4, No. 1, January-June 2026 Online ISSN: 3006-0877 المجلد 4، الاصدار 1، يناير- يونيو 2026

RESEARCH ARTICLE **CONCRETE TECHNOLOGY**

Studying the Effect of Using Local Porous Volcanic Aggregate on the Compressive Strength of Concrete

Munir Al-Kartihi[1*], Mohamed A. Yahya[2]

[1]Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Wadi Alshatti University, Brack, Libya
[2]Civil and Environmental Engineering Department, Engineering Faculty, Sebha University, Sebha, Libya

ARTICLE HISTORY
Received 12 November 2025
Revised 18 December 2025
Accepted 24 December 2025
Online 27 December 2025

KEYWORDS
Volcanic aggregate;
Haruj field;
Compressive strength;
Concrete durability;
Sustainable construction.

ABSTRACT

The sustainable development of the construction sector in arid regions requires the optimization of local natural resources to minimize environmental impact and transportation costs. This study investigates the feasibility and performance of replacing conventional limestone coarse aggregate (CCA) with volcanic aggregate (Basalt rocks) sourced from the Haruj volcanic field in central Libya. An experimental program was conducted using five concrete mixtures with volumetric VA replacement levels of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100%. The study encompassed a detailed characterization of aggregate properties, followed by an evaluation of fresh concrete behaviour (workability, density) and hardened properties (compressive strength at 7, 28, and 90 days, water absorption, and permeability). Results indicate that Haruj VA is a dense, high-strength material with a Los Angeles Abrasion value of 20.48%, comparable to high-quality conventional aggregates. The angular shape and better grain interpenetration also contributed to improving the mechanical performance of the hardened matrix. The 100% VA mixture achieved a 28-day compressive strength of 37.69 MPa, representing an increase of approximately 70% over the reference mix (22.10 MPa). Furthermore, durability was markedly improved, evidenced by a 55% reduction in water penetration depth. This study concludes that Haruj volcanic aggregates are a superior alternative to conventional sedimentary aggregates for producing high-strength, low-permeability structural concrete.

دراسة تأثيراستخدام الركام البركاني المسامي المحلي على مقاومة الضغط للخرسانة

منير أبو القاسم الكرتيجي [1*]، محمد الكيلاني يحيى [1]

الكلمات المفتاحية
الركام البركاني
حقل الهروج
مقاومة الضغط
ديمومة الخرسانة
البناء المستدام

الملخص

تتطلب التنمية المستدامة لقطاع البناء في المناطق الجافة تحسين استخدام الموارد الطبيعية المحلية لتقليل الأثر البيئي وتكاليف النقل. تبحث هذه الدراسة في جدوى وأداء استبدال الركام الخشن التقليدي (الحجر الجيري) بركام بركاني (صخور بازلتية) تم استخراجه من حقل الهروج البركاني في وسط ليبيا. تم تنفيذ برنامج تجريبي باستخدام خمس خلطات خرسانية بنسب استبدال حجمي للركام البركاني بلغت 0%، 25%، 50%، 75%، و100%. شملت الدراسة توصيفاً دقيقاً لخواص الركام، تلاها اختبار مقاومة الضغط عند أعمار 7، 28، و90 يوماً، امتصاص الماء، والنفاذية). تشير النتائج إلى أن ركام الهروج البركاني مادة كثيفة وعالية المقاومة، حيث بلغت قيمة الكشط في جهاز لوس أنجلوس 20.48%، وهي قيمة تضاهي الركام التقليدي عالي الجودة. كما أن الشكل الزاوي والتداخل الحبيبي الأفضل ساهما في تحسين الأداء الميكانيكي للمصفوفة المتصلبة. حققت الخلطة المحتوية على 100% من الركام البركاني مقاومة ضغط عند عمر 28 يوماً بلغت 37.69 ميغاباسكال (MPa)، وهو ما يمثل زيادة بنسبة 70% مقارنة بالخلطة المرجعية (22.10 ميغاباسكال). تخلص هذه الدراسة إلى أن الركام البركاني من منطقة الهروج يعد بديلاً متفوقاً للركام الرسوبي التقليدي لإنتاج خرسانة إنشائية عالية المقاومة.

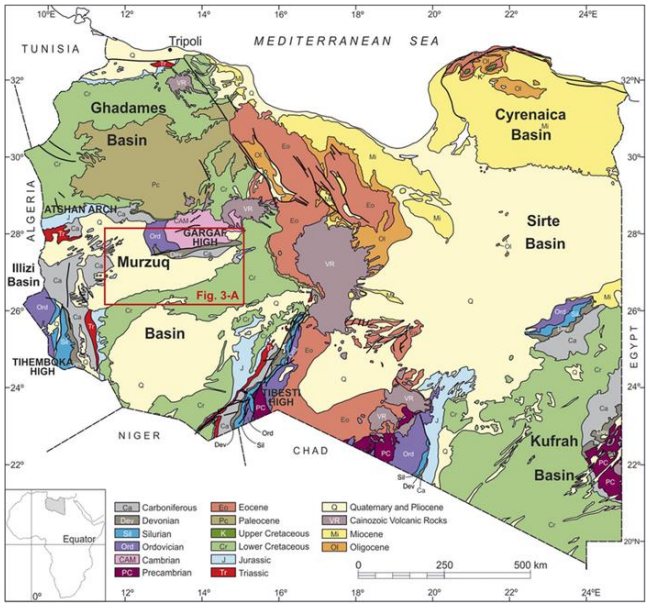
المقدمة

تعد الخرسانة أكثر مواد البناء استخداماً على مستوى العالم، ومع ذلك فإن إنتاجها يستهلك موارد كبيرة. في ليبيا، يعتمد قطاع البناء بشكل أساسي على الحجر الجيري الرسوبي والحجر الرملي للحصول على الركام. ومع ذلك، فإن التوزيع الجغرافي لهذه الموارد غير متكافئ، مما يؤدي إلى ارتفاع تكاليف النقل وضغوط بيئية [1]. حيث تلعب العوامل البيئية القاسية، المتمثلة في ارتفاع درجات الحرارة، وتدني نسب الرطوبة، ونشاط الرياح، بالإضافة إلى قوة الإشعاع الشمسي، دوراً جوهرياً ومباشراً في تغيير خواص الخرسانة، سواء في

*Corresponding author
https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_02
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

مرحلتها اللدنة (الطازجة) أو بعد تصلبها [2]. في المقابل، تمتلك ليبيا حقولاً بركانية شاسعة غير مستغلة، أبرزها "الهروج الأسود" في المنطقة الوسطى، والذي يغطي مساحة تبلغ حوالي 45,000 كيلومتر مربع من التدفقات البازلتية والرواسب البركانية [1، 3].

عالميًا أثبت الركام البركاني - بفضل مساميته الذاتية وتركيبه المعدني – أنه يُضفي خصائص ميكانيكية مُناسبة على الخرسانة عند استخدامها كركام خرسانة مُركّبة [1، 3]. يُشتقّ الركام البركاني (VA) من الصخور البركانية - مثل التوف، والخبث - التي تتميز ببنية خلوية تُضفي مسامية عالية، وكثافة منخفضة، ونشاطًا بوزولانيًا مُلائمًا في بعض الأحيان، وقد أثبتت الأبحاث الدولية أن استخدام المواد البركانية كمواد أسمنتية مُكمّلة (SCMs) يُمكن أن يُحسّن خصائص الخرسانة، بما في ذلك انخفاض الموصلية الحرارية [3]، وتحسين الأداء الميكانيكي عند مستويات استبدال معتدلة وانخفاض النفاذية [4، 5]. ومع ذلك، لا تزال هناك ندرة في البيانات التي تتناول تحديدًا الخصائص الكيميائية والميكانيكية للركام البركاني الليبي، بالإضافة إلى تأثيره على خصائص الخرسانة في ظل الظروف المناخية الجافة وشبه الجافة في ليبيا، ركزت الأبحاث السابقة في ليبيا على توصيف الركام المحلي التقليدي الخشن والناعم (مثل جبس سرت) وتقييم آثاره على السلوك الميكانيكي للخرسانة [6]. والجدير بالذكر أن الدراسة التي أجراها A. M. Blash et al. (2020) [6] وجدت أن ركام الجفرة البركاني يتميز بامتصاص أقل للماء ومقاومة أعلى للصدمات مقارنةً بركام جبس سرت، مما يشير إلى فوائد محتملة لعناصر الهياكل الخرسانية الثقيلة [6]. ومع ذلك عندما يتم استبدال نسبة كبيرة من الركام التقليدي بركام بركاني مسامي لا يزال أداء الخرسانة غير مستكشف بشكل كافٍ في ليبيا، يوضح الشكل (1) الاحواض الرسوبية في ليبيا ومناطق تواجد الصخور البركانية المكونة للركام البركاني [7].



الشكل 1: خريطة جيولوجية لليبيا تُظهر الأحواض الرسوبية الرئيسية

على الرغم من وفرة حقل الهروج البركاني، هناك ندرة في البيانات الفنية المتعلقة بالتفاعل المحدد لهذا الركام الليبي مع الإسمنت البورتلاندي العادي (OPC). ركزت الدراسات الحالية في المنطقة بشكل كبير على الركام التقليدي أو الرمال الناعمة [1]. يهدف هذا البحث إلى سد هذه الفجوة المعرفية من خلال التقييم المنهجي للخواص الفيزيائية والميكانيكية للركام البركاني من منطقة الهروج وتحديد نسبة الاستبدال المثلى لتعظيم مقاومة الخرسانة وديمومتها. كما هو مبين في الشكل (1).

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تقييم جدوى وآثار استخدام الركام البركاني المسامي والذي يتكون أساسًا من تدفقات الحمم البركانية الواسعة المصنوعة من بازلت الأوليفين القلوي كبديل جزئي أو كلي للركام الخشن التقليدي في إنتاج الخرسانة، وآثاره الهيكلية. يتضمن ذلك صياغة تصاميم تجريبية لخلطات تتضمن نسب استبدال حجمية متفاوتة للمواد البركانية، مما يُسهّل إجراء تحليل مقارن شامل للخصائص الفيزيائية والميكانيكية الناتجة مع خصائص عينات التحكم القياسية، وذلك لتحديد مدى جدوى هذه الموارد المحلية في تطبيقات البناء المستدام.

الدراسات السابقة

تم البحث في دراسة F. Farouj, and E. Al-zwai تأثير درجة الحرارة ومدة الحرق على الخواص البوزولانية وتفاعلية المادة الناتجة. وذلك باستخدام الكاؤلين المتوفر محليًا بوفرة في جنوب ليبيا [8]، أجرى A. Abutaqa et al. (2024) دراسة تجريبية حول تأثير الرماد البركاني كمواد مضافة في الخرسانة، أظهرت نتائجهم أن استبدال 10% من الركام الخشن بالركام البركاني يمكن أن يزيد من مقاومة الانثناء بنسبة 35.6% ومقاومة الضغط بنسبة 5.6% بعد 28 يومًا [4]. علاوة على ذلك، أدى إدراج الركام البركاني إلى تقليل عمق اختراق الماء بشكل كبير بنسبة تصل إلى 56.5%، مما يشير إلى تحسن المتانة، كشف التحليل المجهري باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM)عن تحسن في كثافة البنية الدقيقة للخرسانة، والذي يُعزى إلى النشاط البوزولاني العالي للرماد البركاني، اقترحت الدراسة مستوى استبدال مثاليًا بنسبة 15% من المصادر البركانية لتحسين مقاومة الضغط والشد الانشطاري والانثناء [3].

وبالمثل، قام J. Bawab et al. (2024) بالتحقيق في التأثير التآزري للرماد البركاني وبقايا كربيد الكالسيوم على المركبات الإسمنتية، تم ملاحظة أن الرماد البركاني بمتوسط حجم جسيمات أقل من 2 مم، يمتلك خصائص بوزولانية ويوفر فوائد بيئية بسبب معالجته السلسة [9]. أشار البحث إلى أن دمج الركام البركاني بنسب استبدال 15% و 30% من ركام الإسمنت قلل من قابلية الانسياب، ومع ذلك، كان لاستبدال ما يصل إلى 15% من الركام البركاني تأثير هامشي فقط على الانسياب، بينما أدت النسب المئوية الأعلى إلى انخفاض، كما وجد أن الركام البركاني يؤخر زمن الشك الابتدائي والنهائي للخرسانة؛ على سبيل المثال، أدت زيادة محتوى الركام البركاني من 30% إلى

50% إلى إطالة زمن الشك الابتدائي من 140 إلى 190 دقيقة وزمن الشك النهائي من 220 إلى 260 دقيقة. في حين أن استبدال ما يصل إلى 20% من الركام البركاني أعطى مقاومة ضغط مماثلة للملاط المرجعي، أدت معدلات الاستبدال الأعلى إلى انخفاض يصل إلى 33%. ومن المثير للاهتمام أن الخرسانة ذات الركام ثقيل الوزن مع استبدال ما يصل إلى 20% من الركام البركاني أظهرت مقاومة ضغط فائقة في فترات المعالجة اللاحقة [9]. تؤكد هذه الدراسات على الدور المزدوج للمواد البركانية كركام ومواد إسمنتية مضافة، مما يوفر نهجًا متعدد الاستخدامات لتطوير الخرسانة المستدامة.

يؤثر دمج الركام البركاني بشكل كبير على كل من الخصائص الطرية والجافة للخرسانة، تعتمد هذه التأثيرات إلى حد كبير على نوع الركام البركاني وخصائصه الفيزيائية والكيميائية والنسبة التي يحل بها محل الركام الخشن.

يمكن أن تؤثر قدرة ركام الخفاف العالية على الاحتفاظ بالماء سلبًا على خصائص الخرسانة الطرية، مما قد يؤدي إلى انخفاض في قيمة الهبوط بسبب زيادة الاحتكاك الداخلي وارتفاع الطلب على الماء لتغطية السطح. يستلزم هذا تعديلاً دقيقًا لنسب الماء إلى الإسمنت أو استخدام الملدنات الفائقة للحفاظ على قابلية التشغيل المطلوبة. وعلى العكس من ذلك، يمكن أن يؤثر استخدام الرماد البركاني كركام مضافة أيضًا على قابلية الانسياب وأزمنة الشك، حيث أدى المحتوى الأعلى من الرماد البركاني إلى انخفاض قابلية الانسياب وإطالة أزمنة الشك [9]. تتأثر كثافة الخرسانة الطرية أيضًا بشكل مباشر بكثافة الركام المستخدم؛ حيث يمكن للركام البركاني ثقيل الوزن، مثل الخفاف، أن يقلل بشكل كبير من كثافة الخرسانة الطرية، مما يساهم في إنتاج الخرسانة ثقيلة الوزن.

تُعد خصائص الخرسانة الجافة، بما في ذلك مقاومة الضغط ومقاومة الشد والكثافة، ذات أهمية قصوى للسلامة الإنشائية والأداء. أظهرت الأبحاث باستمرار أن استخدام الركام البركاني يمكن أن يكون له تأثيرات متنوعة على هذه الخصائص، وغالبًا ما يعتمد ذلك على مستوى الاستبدال والنوع المحدد للمادة البركانية.

قام Y. Çetin (2025) بالتحقيق في استخدام ركام البازلت في الخرسانة، مع التركيز على قوانين تأثير الحجم، وجدت الدراسة أن ركام البركاني يساهم في متانة الخرسانة وأن حجم الركام يمكن أن يؤثر على القوة، حيث تُظهر العينات الأصغر عمومًا قوة أعلى [10]. يشير هذا إلى أن الدراسة الدقيقة لتدرج الركام مهمة عند استخدام الركام البركاني في الخرسانة.

أفادت الدراسات حول الطفلة البركانية والرماد البركاني كمواد إسمنتية مضافة عن تحسينات في الخواص الميكانيكية. وجد A. Abutaqa et al. (2024) أن استبدال 10% من ركام الإسمنت بالطفلة البركانية الطبيعية (NVT)زاد من مقاومة الانثناء والضغط [3]. ولاحظ J. Bawab et al. (2024) أن استبدال ما يصل إلى 20% من الركام البركاني يمكن أن ينتج مقاومة ضغط مماثلة للخلطات المرجعية، وحتى قوة فائقة في فترات المعالجة اللاحقة للخرسانة ذات الركام ثقيل الوزن [9]. ومع ذلك، أدت مستويات الاستبدال الأعلى للركام البركاني أحيانًا إلى انخفاض في مقاومة الضغط، مما يسلط الضوء على أهمية تحديد نسب الاستبدال المثلى لموازنة الأداء واستخدام المواد.

تتعلق كثافة الخرسانة الجافة مباشرة بكثافة الركام. يُعد الركام البركاني ثقيل الوزن، مثل الخفاف، فعالاً في إنتاج الخرسانة ثقيلة الوزن، والتي يمكن أن تقلل من الحمل الميت على الهياكل وتقدم مزايا في التصميم الزلزالي والنقل. أظهرت الدراسات أن زيادة محتوى ركام الخفاف تقلل من كثافة الخرسانة، وبالتالي إنتاج خرسانة ثقيلة الوزن [9].

تتمثل إحدى أهم مزايا استخدام بعض أنواع الركام البركاني، في كثافتها العالية، مما يسهل إنتاج الخرسانة ثقيلة الوزن، تقدم الخرسانة ثقيلة الوزن فوائد عديدة، بما في ذلك تحسين العزل الحراري، وتعزيز مقاومة الحريق. تتناسب كثافة الخرسانة طرديًا مع كثافة الركام المكون لها. لذلك، يمكن أن يؤدي استبدال الركام الكثيف الخشن بركام بركاني ثقيل الوزن إلى زيادة كثافة الخرسانة الإجمالية بشكل كبير، على سبيل المثال، أظهرت الدراسات باستمرار أن زيادة نسبة ركام البركاني في خلطة الخرسانة تؤدي إلى ازدياد مماثل في كثافة الخرسانة [10].

المواد وطرق العمل

استخدمت هذه الدراسة برنامجًا تجريبيًا منهجيًا لدراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية للخرسانة المُدمجة بالركام البركاني .(VA) قبل المرحلة التجريبية، أُجريت مراجعة شاملة للدراسات المتوفرة حول الركام عالي الكثافة والركام البركاني. ساهمت هذه المراجعة في وضع معايير أداء، وإثراء معايير تصميم الخلطة، وتوفير إطار مقارن لتحليل آثار الركام البركاني على سلوك الخرسانة.

شملت المواد المكونة المستخدمة في هذا البحث الإسمنت البورتلاندي العادي (OPC)، والركام الناعم الطبيعي، والركام البركاني المسامي الجاف، ولضمان موثوقية التجربة واتساقها، تم شراء جميع المواد مع الالتزام الصارم بمعايير الجودة ذات الصلة.

وُضعت تصاميم خلطات خرسانية لمجموعتين مختلفتين: خرسانة مرجعية (تقليدية) وخرسانة معدلة بالركام البركاني المسامي. تم تحديد نسب الخلط بناءً على إرشادات وُضعت في دراسات سابقة، وكان الهدف الرئيسي هو تحقيق قابلية تشغيل ومتانة متقاربة بين الخلطات المرجعية والخلطات التجريبية. أُجريت عملية الخلط باستخدام خلاطة مختبرية قياسية. بعد عملية الخلط، صُبّت عينات أسطوانية ومكعبة قياسية، وخضعت لنظام معالجة مُتحكم فيه لضمان ترطيب متجانس.

تم توصيف خصائص الخرسانة الطازجة والمتصلدة وفقًا للمعايير والمواصفات الليبية. تضمن اختبار الخرسانة الطازجة قياسات الانكماش، والتدفق (الانتشار)، والكثافة الطازجة، ودرجة الحرارة. أُخضعت عينات الخرسانة المتصلدة لاختبارات قوة الضغط، ووزن الوحدة، وامتصاص الماء،

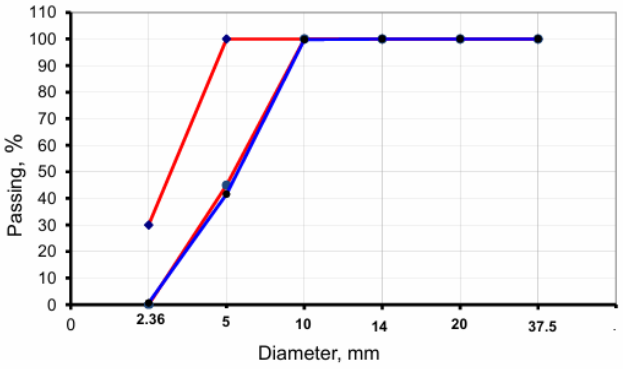
والنفاذية.

تم القيام بالاختبارات في شركةGround Engineering ، حيث تقدم الشركة خدمات التحقيق في الموقع، والاختبار الميداني، والاختبارات المعملية، أيضاً تم إجراء اختبارات الإسمنت والركام في موقع شركة الاتحاد العربي للمقاولات كجزء من إجراءات ضمان الجودة. شملت الفحوصات قياس الامتصاص والكثافة النوعية للركام، بالإضافة إلى اختبارات الخرسانة، مع أخذ عينات وفق إجراءات أخذ العينات المعتمدة .

اختبارات الركام

التحليل المنخلي للركام الناعم

يُظهر التحليل المنخلي كما هو موضح بالشكل (2) أن تدرج الركام الناعم مطابق للمواصفة القياسية البريطانية المحددة. العينة خشنة بشكل عام (عند منخل 5 مم).



الشكل 2: التحليل المنخلي للركام الناعم

نسبة الامتصاص والوزن النوعي للركام الناعم

تظهر نتائج متوسط امتصاص الماء بنسبة 1.45%، وتظهر متوسط الكثافة الكلية (الوزن النوعي في حالة التشبع والسطح جاف (2.66 ميلجرام/م³)، كما هو موضح في الجدول (1).

الجدول 1: نسبة الامتصاص والوزن نوعي للركام الناعم

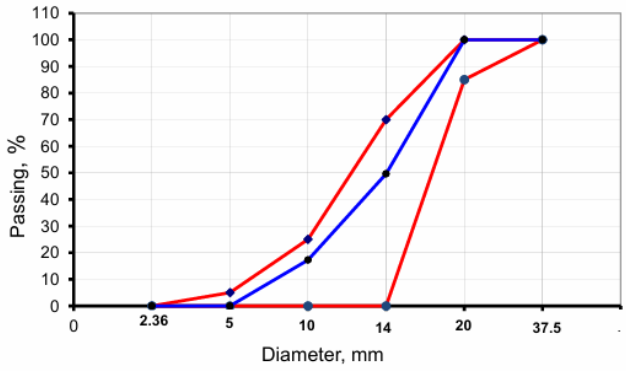
رقم العينة	أ	ب	د	ρ الكثافة الكلية (ميجاجرام/م³)	ρ الكثافة الظاهرية (ميجاجرام/م³)	متوسط الكثافة الكلية (ميجاجرام/م³)	(%) امتصاص الماء	متوسط امتصاص الماء (%)
1	750.1	469.3	739.1	2.67	2.74	2.66	1.49	**1.45**
2	750.4	468.1	740.0	2.66	2.72		1.41	

حيث أ هي كتلة العينة المشبعة والمجففة السطح، بالجرام، ب هي الكتلة الظاهرية في الماء للعينة المشبعة، بالجرام، د هي كتلة العينة المجففة في الفرن، بالجرام، ρ هي كثافة الجسيمات.

نسبة 1.45% تعتبر نسبة امتصاص معقولة ومقبولة للركام الناعم الطبيعي (عادة تكون أقل من 2%). هذا يعني أن الركام لن يمتص كمية كبيرة من ماء الخلط، مما يسهل التحكم في نسبة الماء إلى الإسمنت. قيمة 2.66 هي قيمة نموذجية وفق المواصفات القياسية البريطانية للركام الطبيعي المشتق من صخور السيليكا (عادة بين 2.6 و2.7). هذا يدل على أن الركام ذو كثافة طبيعية .

التحليل المنخلي للركام الخشن

بناءً على النتائج، فإن عينة الركام الخشن مطابقة للمواصفات القياسية البريطانية كل نتائج "نسبة المار التراكمي" تقع ضمن الحدود المسموح بها (الأدنى والأعلى)، مما يعني أن هذا الركام مناسب للاستخدام في الأغراض الإنشائية التي تتطلب هذا النوع من التدرج الحبيبي.



الشكل 3: التحليل المنخلي للركام الخشن

نسبة الامتصاص و الوزن نوعي الركام الخشن

تظهر نتائج متوسط امتصاص الماء بنسبة 0.95%، وتظهر متوسط الكثافة الكلية (الوزن النوعي في حالة التشبع والسطح جاف (2.66 ميلجرام/م³)، كما هو موضح في الجدول (2).

الجدول 2: نسبة الامتصاص والوزن نوعي للركام الخشن

رقم العينة	أ	ب	د	ρ الكثافة الكلية (ميجاجرام/م³)	ρ الكثافة الظاهرية (ميجاجرام/م³)	متوسط الكثافة الكلية (ميلجرام/م³)	(%) امتصاص الماء	متوسط امتصاص (%) الماء
1	1000.9	624.8	991.4	2.66	2.70	2.66	0.96	**0.95**
2	1000.6	624.9	991.3	2.66	2.71		0.94	

نسبة امتصاص أقل من 1% (0.95%) تعتبر ممتازة للركام الخشن. تدل على أن الركام ذو مسامية منخفضة، مما يساهم في متانة الخرسانة ومقاومتها للعوامل البيئية..

قيمة 2.66 هي قيمة نموذجية للركام الطبيعي المشتق من صخور السيليكا (عادة بين 2.6 و2.7) تبعاً المواصفات القياسية البريطانية . هذا يدل على أن الركام ذو كثافة طبيعية وليس خفيف الوزن

استطالة الركام الخشن

هذه الاختبارات تقيس شكل حبيبات الركام، حيث أن الحبيبات المستطيلة (Elongated) أو المفلطحة (Flaky) تؤثر سلبًا على قابلية التشغيل وتتطلب كمية أكبر من الماء.

تم إجراء اختبار معامل الاستطالة على عينة الركام، وتم فصل العينة إلى 3 أجزاء رئيسية (فوق 10 مم، بين 10 و6.3 مم)، أظهرت النتائج أن معامل الاستطالة الإجمالي لهذه العينة هو 29%، كما هو موضح بالجدول (3).

تم إجراء اختبار معامل التفلطح على عينة الركام، وتم فصل العينة إلى 3 أجزاء رئيسية (فوق 10 مم، بين 10 و6.3 مم)، أظهرت النتائج أن معامل التفلطح الإجمالي لهذه العينة هو 19%، كما هو موضح بالجدول (4).

الجدول 3: بيانات تحديد معامل الاستطالة للركام الخشن

حجم فتحة المنخل (اختبار)	المسافة بين الأوتاد (مم)	الكتلة المحجوزة (جم)	النسبة المئوية المحجوزة (%)	كتلة الجسيمات المستطيلة (جم)	معامل الاستطالة الفردي (%)	معامل الاستطالة الإجمالي (%)
50	-	-	-	-	-	29
37	78.7 ± 0.3	0	0.0	0	-	
28	59.0 ± 0.3	0	0.0	0	-	
20	43.2 ± 0.3	0	0.0	0	-	
14	30.6 ± 0.3	699	69.9	141	20	
10	21.6 ± 0.2	266	26.6	136	51	
6.3	14.7 ± 0.2	35	3.5	24	-	

الجدول 4: بيانات لتحديد مؤشر التفلطح للركام الخشن

حجم فتحة المنخل (اختبار)	المسافة بين الأوتاد (مم)	الكتلة المحجوزة (جم)	النسبة المئوية المحجوزة (%)	كتلة الجسيمات المتفلطحة(جم)	معامل التفلطح الفردي (%)	معامل التفلطح الإجمالي (%)
النسبة المحجوزة %						
50	33.9	0	0	0	-	19
37	26.3	0	0.0	0	-	
28	19.7	0	0.0	0	-	
20	14.4	0	0.0	0	-	
14	10.2	699	70	160	23	
10	7.2	266	27	25	9	
6.3	4.9	35	4	4	-	

الحدود المقبولة لهذه المعاملات تعتمد على نوع الاستخدام. بشكل عام، للخرسانة عالية الجودة، يفضل أن تكون القيم وفق المواصفات القياسية البريطانية أقل من 25-30%.

لتفلطح (19%): قيمة جيدة جدًا وتدل على أن شكل الحبيبات قريب من المكعب.

الاستطالة (29%): تعتبر قيمة مقبولة لمعظم التطبيقات الخرسانية، ولكنها قد تكون على الحافة العليا للتطبيقات التي تتطلب قابلية تشغيل عالية جدًا (مثل الخرسانة المقذوفة).

تهشيم الركام الخشن

الغرض من هذا الاختبار هو قياس مقاومة الركام (الحصى) لعملية السحق أو التهشم تحت تأثير حمل ضاغط تدريجي. النتيجة تعطي مؤشراً على قوة الركام ومدى صلاحيته للاستخدام في تطبيقات تتطلب صلابة عالية، مثل طبقات أساس الطرق أو الخرسانة عالية المقاومة.

الجدول 5: نتائج اختبار قيمة تهشم للركام الخشن

رقم	وزن الصينية، جم	W0 (جم)	W1 (جم)	W2 (جم)	W3 (جم)	قيمة تهشم الركام، % (ACV)	متوسط قيمة تهشم الركام، % (ACV)
1	873.00	3787.00	2914.00	562.00	2352.00	19.3	19
2	873.00	3832.00	2959.00	554.00	2405.00	18.7	

كما هو موضح بالجدول (5) متوسط قيمة تهشم الركام (ACV) لهذه العينة هو 19%، هذه القيمة تعتبر منخفضة جداً وممتازة، وتدل على أن الركام يتمتع بقوة وصلابة عالية ومقاومة ممتازة للتهشم. بناءً على هذه النتيجة، فإن هذا الركام مناسب جداً للاستخدام في التطبيقات الإنشائية الأكثر تطلباً، مثل الخرسانة عالية الأداء، والطبقات السطحية للطرق والمطارات التي تتعرض لأحمال مرورية ثقيلة وذلك وفق المواصفات القياسية البريطانية.

معامل لوس أنجلوس الركام الخشن

كما هو موضح بالجدول (6) قيمة معامل لوس أنجلوس لهذا الركام هي 20.98%، تعتبر ممتازة جداً. بشكل عام، الركام الذي تقل قيمة البري له عن 30% يعتبر مناسباً للطبقات السطحية للطرق والخرسانة عالية الجودة. وقيمة مثل 20.98% تدل على أن هذا الركام صلب جداً، متين، ومقاوم للتآكل، مما يجعله مثالياً للاستخدام في التطبيقات الإنشائية الأكثر تطلباً.

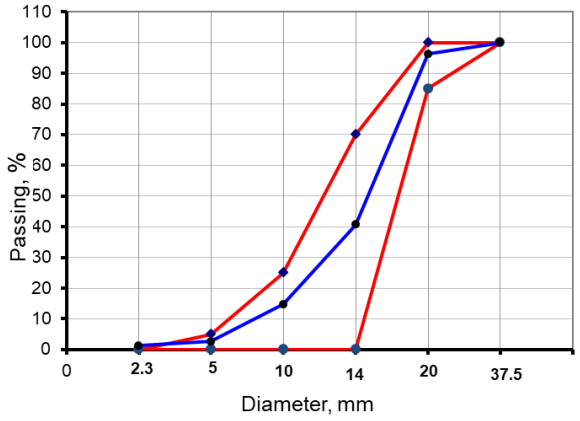
الجدول 6: بيانات تحديد معامل لوس أنجلوس للركام الخشن

تصنيف تدرج عينة الاختبار	الكتلة المحجوزة على كل منخل، جم	عدد الكرات	كتلة الشحنة، جم	الكتلة المحجوزة على منخل 1.7 مم، جم	معامل لوس أنجلوس (LA)
B	10 ± 2500	11		3951	**20.98**

اختبارات الركام البركاني المسامي المحلي

التحليل المنخلي للركام البركاني المسامي المحلي

معظم مقاسات المناخل تقع ضمن حدود المواصفة، كما هو موضح بالشكل (4)، وهي مطابقة المواصفة البريطانية (0-0%).



الشكل 4: التحليل المنخلي للركام البركاني

نسبة الامتصاص والوزن نوعي الركام البركاني المسامي

كما هو موضح بالجدول (7) تظهر نسبة الامتصاص قيمة تبلغ (1.74%) وهي أعلى من الركام الخشن العادي (0.95%)، وهو أمر متوقع في الركام البركاني بسبب طبيعته المسامية. هذه القيمة لا تزال مقبولة حسب المواصفات القياسية البريطانية، ولكن يجب أخذها في الاعتبار بدقة عند تصميم الخلطة لتعويض الماء الذي سيمتصه الركام. الوزن النوعي (2.75 ميلجرام/م^3): قيمة أعلى بقليل من الركام الطبيعي، مما يدل على أنه ليس من النوع خفيف الوزن.

الاستطالة والتفلطح للركام البركاني

معامل استطالة الركام البركاني هو 36% كما هو موضح بالجدول (8). هذه القيمة تعتبر مقبولة نسبياً. العديد من المواصفات القياسية البريطانية، خاصة للطرق والخرسانة عالية الجودة، تشترط أن تكون هذه القيمة أقل من 35% أو حتى أقل. هذا يعني أن هذا الركام يحتوي على نسبة ملحوظة من

الحبيبات الطويلة والرفيعة.

الجدول 7: نسبة الامتصاص والوزن نوعي للركام البركاني

رقم العينة	أ	ب	د	ρ الكثافة الكلية (ميجاجرام/م³)	ρ الكثافة الظاهرية (ميجاجرام/م³)	متوسط الكثافة الكلية	امتصاص الماء (%)	متوسط امتصاص الماء (%)
1	1000.2	635.5	982.4	2.74	2.83	2.75	1.81	1.74
2	1000.1	636.3	983.7	2.75	2.83		1.67	

الجدول 8: بيانات تحديد معامل الاستطالة للركام البركاني

حجم فتحة المنخل (اختبار)	المسافة بين الأوتاد (مم)	الكتلة المحجوزة (جم)	النسبة المئوية المحجوزة (%)	كتلة الجسيمات المستطيلة (جم)	معامل الاستطالة الفردي (%)	معامل الاستطالة الإجمالي (%)
50	-	-	-	-	-	36
37	78.7 ± 0.3	0	0	0	-	
28	59.0 ± 0.3	0	0	0	-	
20	43.2 ± 0.3	86	9	24	28	
14	30.6 ± 0.3	462	48.1	110	24	
10	21.6 ± 0.2	281	29.3	148	53	
6.3	14.7 ± 0.2	131	13.6	65	50	

يبين الجدول (9) معامل التفلّطح لهذا الركام البركاني هو 13%. هذه القيمة تعتبر ممتازة جداً. معظم المواصفات القياسية البريطانية تشترط أن تكون هذه القيمة أقل من 25% أو 30%. نتيجة 13% تدل على أن حبيبات هذا الركام ذات شكل مكتل (Cubical) وهو الشكل المثالي للركام المستخدم في الخرسانة والأسفلت.

الجدول 9: بيانات لتحديد مؤشر التفلطح للركام البركاني

حجم فتحة المنخل (اختبار)	المسافة بين الأوتاد (مم)	الكتلة المحجوزة (جم)	النسبة المئوية المحجوزة (%)	كتلة الجسيمات المتفلطحة (جم)	معامل التفلطح الفردي (%)	معامل التفلطح الإجمالي (%)
50	33.9	0	0	0	-	13
37	26.3	0	0.0	0	-	
28	19.7	0	0.0	0	-	
20	14.4	86	9	11	13	
14	10.2	462	48	43	9	
10	7.2	281	29	45	16	
6.3	4.9	131	14	25	19	

تهشيم الركام البركاني المسامي

يبين الجدول (10) متوسط قيمة تهشم الركام البركاني هو 23%، هذه النتيجة تعتبر جيدة جداً. بشكل عام في المواصفات القياسية البريطانية، لذلك يمكن الاستنتاج أن هذا الركام البركاني يتمتع بقوة وصلابة عالية تجعله مناسباً للاستخدام في التطبيقات الإنشائية التي تتطلب ركاماً ذا جودة عالية ومقاومة جيدة للأحمال.

الجدول 10: نتائج اختبار قيمة التهشيم للركام البركاني

رقم	وزن الصينية، جم	W0 (جم)	W1 (جم)	W2 (جم)	W3 (جم)	قيمة تهشم %الركام، (ACV)	متوسط قيمة تهشم الركام، % (ACV)
1	873.00	3674.00	2801.00	605.00	2196	21.6	23
2	873.00	3675.00	2802.00	694.00	2108	24.8	

معامل لوس أنجلوس الركام البركاني المسامي

يظهر الجدول (11) قيمة معامل لوس أنجلوس هي 20.48% وتعتبر قيمة ممتازة ومقاربة جدًا للركام الخشن الأول، مما يثبت أن الركام البركاني يتمتع بمقاومة عالية جدًا للتآكل والبري، وهي ميزة كبيرة.

الجدول 11: بيانات تحديد معامل لوس أنجلوس للركام البركاني

تصنيف تدرج عينة الاختبار	الكتلة المحجوزة على كل منخل، جم	عدد الكرات	كتلة الشحنة، جم	الكتلة المحجوزة على منخل 1.7 مم، جم	معامل لوس أنجلوس (LA)
B	10 ± 2500	11		3976	**20.48**

اختبارات الخرسانة الطرية

اختبار الهبوط (Slump Test)

اختبار الهبوط هو اختبار ميداني بسيط ولكنه مهم، يُستخدم لقياس قوام وقابلية تشغيل الخرسانة الطرية. تصف قابلية التشغيل مدى سهولة خلط الخرسانة وصبها ودمكها وتشطيبها دون حدوث انفصال حبيبي. تُعرف نتيجة الاختبار باسم "الهبوط"، وهي تشير إلى سيولة الخلطة.تم اجرا اختبار الهبوط وفقًا للمعيار ASTM C143.

اختبار الكثافة (Density Test)

يقيس اختبار الكثافة كتلة المادة لكل وحدة حجم، تُعد الكثافة مؤشرًا أساسيًا للجودة والأداء، يكون للمادة المدموكة بشكل صحيح كثافة أعلى، وهو ما يتوافق مع وجود فراغات هوائية أقل. يؤدي انخفاض محتوى الفراغات بشكل عام إلى قوة أعلى، وتقليل النفاذية للماء والمواد الكيميائية، وزيادة المتانة ضد العوامل البيئية، تم اجرا الاختبار وفقًا للمعيار ASTM C138.

اختبارات الخرسانة الصلبة

اختبار مقاومة الضغط (Compressive strength)

يُعد اختبار مقاومة الضغط أكثر اختبارات مراقبة الجودة شيوعًا على الخرسانة المتصلبة لقياس قدرتها على تحمل أحمال الضغط. وتُعتبر مقاومة الضغط المقياس الأساسي المستخدم لتحديد مدى استيفاء الخرسانة لمتطلبات تصميم أي هيكل، تشير نتيجة الاختبار إلى جودة الخلطة الخرسانية وقدرتها على تحمل الأحمال . تم اجرا الاختبار وفقًا للمعيار ASTM C39.

بعد فترة التصلب الأولية التي تبلغ 24 ساعة، تُزال العينات بعناية من القوالب وتُنقل إلى بيئة تصلب مُتحكم بها (مثل خزان ماء أو غرفة رطبة) حتى يتم اختبارها عند عمر محدد (عادةً 7 أو 14 أو 28 يومًا). كما هو موضح بالشكل (5) .

يتم تحديد مقاومة الخرسانة في كل فترة زمنية، بحيث توضع المكعبات بين سطحي آلة الضغط وتطبق عليها حمولة منتظمة. كما هو موضح بالشكل (6).

الشكل 5: تجفيف قوالب الخرسانة

الشكل 6: تسليط الحمل على قوالب الخرسانة

اختبار وحدة الوزن (Unit Weight Test)

يُعد اختبار وحدة الوزن اختبارًا ميدانيًا مهم، يُستخدم لتحديد كثافة الخرسانة الجافة. يقيس الاختبار وزن الخرسانة لكل وحدة حجم، تُستخدم النتيجة للتأكد من صحة نسب الخلطة، ولحساب إنتاجية دفعة الخرسانة، وللتحقق من توافق وزن الخرسانة مع افتراضات التصميم الإنشائي .

اختبار الامتصاص (Absorption Test)

يحدد اختبار الامتصاص كمية الماء التي يمكن لعينة خرسانية أو أسفلتية متصلدة أن تمتصها وتحتفظ بها داخل بنيتها المسامية. هذه الخاصية هي مقياس مباشر لحجم الفراغات النفاذة — وهي المسام المترابطة التي تسمح للسوائل باختراق المادة وفقًا للمعيار ASTM C39. يُعبَّر عن نتيجة الاختبار كنسبة مئوية من الوزن الجاف للمادة. حيث تُوضع المكعبات في فرن على درجة حرارة 100 درجة مئوية. يعمل الفرن على تجفيف العينات حتى تصل إلى كتلة ثابتة. كما هو موضح بالشكل (7).

اختبار النفاذية (Permeability Test)

الهدف من اختبار نفاذية الخرسانة الجافة هو تحديد الموصلية الهيدروليكية للطبقة الأسمنتية المتصلبة تحت تدرج هيدروليكي مُتحكم فيه بواسطة الجهاز كما هو موضح بالشكل (8). تُعد النفاذية معيارًا أساسيًا للمتانة، إذ تُحدد معدل انتقال العوامل الضارة (مثل أيونات الكلوريد والكبريتات والمياه العكرة) إلى الخرسانة.

الشكل 7: تجفيف العينات عند درجة حرارة 100 درجة مئوية

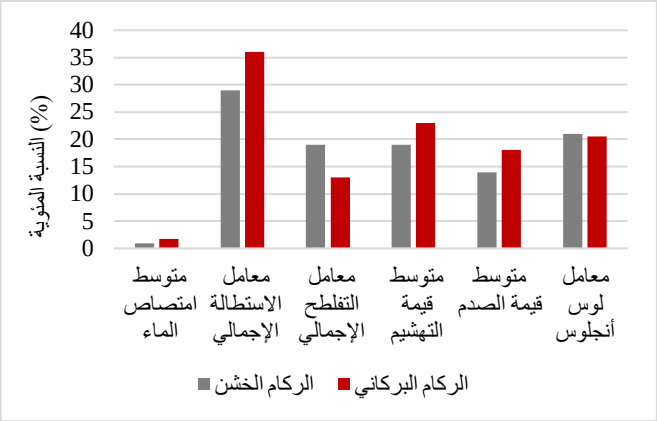
الشكل 8: جهاز اختبار النفاذية

النتائج والمناقشة

نتائج اختبارات الركام

يبين الشكل (9) تحليلاً مقارناً للخصائص الفيزيائية والميكانيكية للركام الخشن مقابل الركام البركاني عبر ستة مؤشرات موحدة، يُظهر الركام الخشن مرونة ميكانيكية فائقة، ويتجلى ذلك في انخفاض نسب كلٍّ من متوسط قيمة التهشيم (19% مقابل 23%) النتائج مطابقة للمواصفة حيث يجب أن تكون قيمة التهشيم لا تتجاوز 30%، ومتوسط قيمة الصدم (14% مقابل 18%)، مما يدل على مقاومة أعلى لأحمال الضغط والصدمات المفاجئة مقارنةً بالعينات البركانية وتشير أن الخرسانة قوية وفقاً للمواصفة القياسية IS:2386. من حيث المسامية، يُظهر الركام البركاني معدل امتصاص

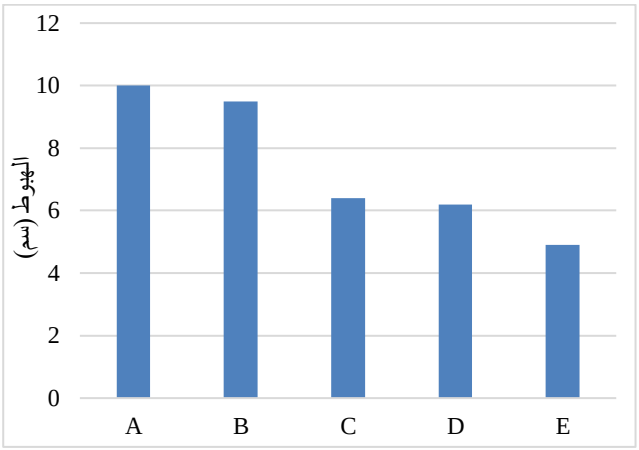
متوسط أعلى بكثير (1.74%) مقارنةً بالركام الخشن (0.95%)، وهو ما يتوافق مع الطبيعة الحويصلية للصخور النارية البركانية. حيث تشير المواصفة أنه يجب أن تكون نسبة الامتصاص أقل من1.5%. من الناحية الشكلية، يُظهر الركام البركاني مؤشر استطالة أعلى (36%)، وهو متوافق مع المواصفة القياسية (أقل من 40%)، ويُعطي مؤشر تفلطح أفضل (أقل (13%) من الركام الخشن (19%). وهو أقل من الحد الأعلى للمواصفة القياسية (30% من التفلطح)، والجدير بالذكر أن معامل تآكل لوس أنجلوس يُظهر تفاوتًا ضئيلًا بين النوعين (20.98% مقابل 20.48%)، مما يُشير إلى أنه على الرغم من الاختلافات في الكثافة الداخلية وهندسة الجسيمات، يتمتع كلا الركامين بمقاومة مُتقاربة للتآكل السطحي والتآكل، تشير المواصفة أن النسبة المطلوبة هي أقل من 30%.



الشكل 9: نتائج اختبارات الركام

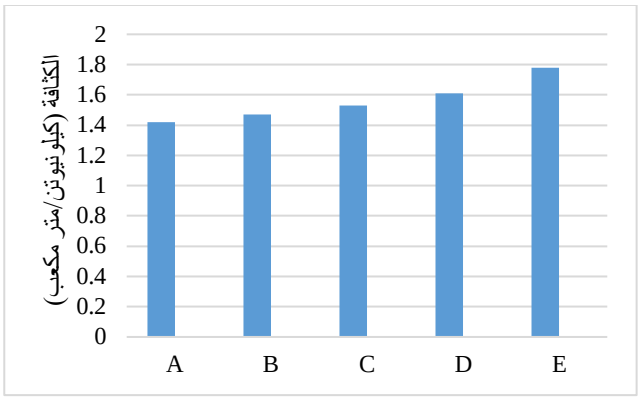
نتائج اختبارات الخرسانة الطرية

تُوضح النتائج تباين كبير في قابلية التشغيل بين العينات المختلفة. أظهرت العينات A ، B، قيم هبوط عالية جدًا، في المقابل أظهرت العينات (C و D)انخفاضًا في قيم الهبوط، مما يدل على تماسك لدن أكبر، بينما أظهرت العينة (E) أدنى قابلية للتشغيل بمتوسط هبوط 51% كما هو موضح بالشكل (10).



الشكل 10: نتائج اختبار الهبوط للخرسانة الطرية

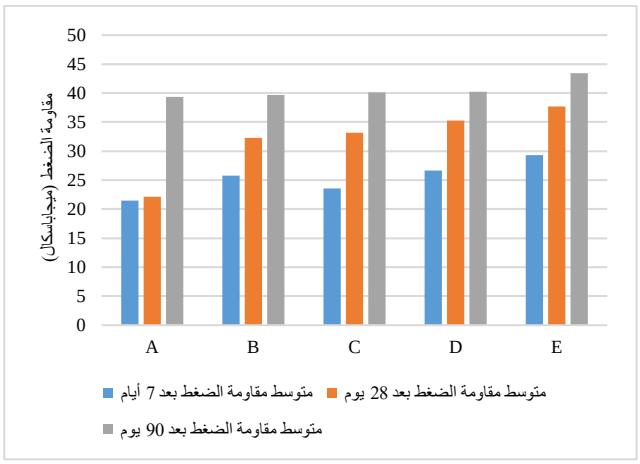
أدت التحسينات التدريجية في خليط الخرسانة واستبدالها بنسب الركام الخشن من العينة (A) إلى العينة (E) إلى مادة أكثر كثافة وأقل مسامية، مما أدى بدوره إلى تحسين متانتها بشكل ملحوظ. كما هو موضح بالشكل (11).



الشكل 11: نتائج اختبار الكثافة الخرسانة الطرية

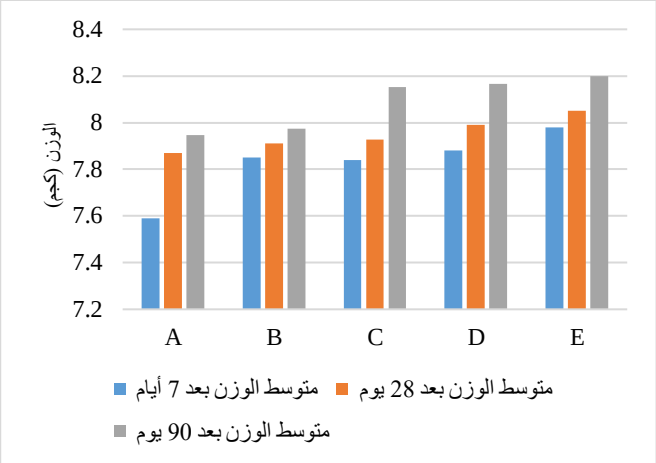
نتائج اختبارات الخرسانة الصلبة

أظهرت قوة الضغط ارتباطًا إيجابيًا بمحتوى الركام البركاني عبر جميع فترات المعالجة. ولوحظ اتجاه تصاعدي واضح منذ 7 أيام، حيث ارتفع متوسط القوة من 21.5 ميغاباسكال (العينة A) إلى 29.29 ميغاباسكال (العينة E). بنسبة زيادة تصل الى 27% وتكثف هذا التزايد بمرور الوقت؛ فبعد 28 يومًا، وصلت العينة E إلى 37.7 ميغاباسكال بنسبة تزيد عن 30%، وبلغت ذروتها بعد 90 يومًا عند 43.40 ميغاباسكال بنسبة تفوق 10% عن الخلطة المرجعية، كما هو موضح بالشكل (12)، مما يؤكد الفوائد طويلة المدى للركام. وتُعزى المكاسب الملحوظة في القوة في العينات ذات نسب الركام الأعلى (E-C) إلى تفاعل بوزولاني متقدم. تُحسّن هذه الآلية بنية مسام الخرسانة وتُكثف منطقة الانتقال بين السطوح (ITZ)، مما يُؤدي إلى أداء ميكانيكي فائق ومتانة مُحسّنة.



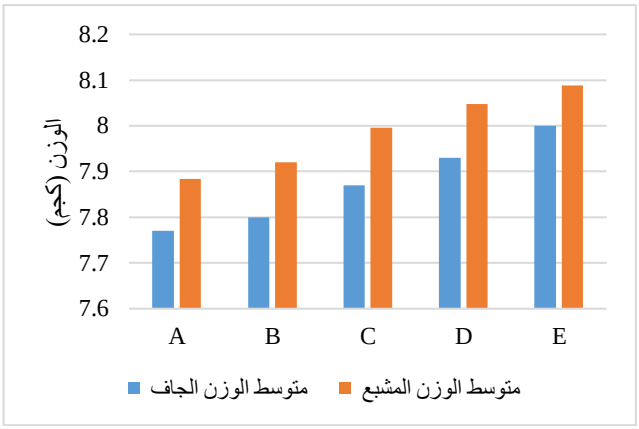
الشكل 12: نتائج اختبار مقاومة الضغط

أظهرت قياسات وزن العينات بعد 7 أيام زيادة تدريجية في الكتلة من العينة A (7.59 كجم) إلى العينة E (7.98 كجم) بنسبة تصل الى 4%، كما هو موضح بالشكل (13)، وبالنظر إلى ثبات حجم العينة، يشير هذا الاتجاه إلى أن الركام البركاني يتمتع بكثافة نوعية أعلى من الركام الخشن القياسي الذي حل محله. وأكدت القياسات اللاحقة بعد 28 و90 يومًا هذا التسلسل الهرمي للكثافة (A < B < C <D <E)، مؤكدةً التأثير المباشر لمحتوى الركام البركاني على الوزن النهائي للوحدة. بالإضافة إلى ذلك، تُعزى الزيادة الطفيفة في الكتلة الملحوظة عبر جميع الفترات إلى الترابط الكيميائي المستمر للماء أثناء ترطيب الأسمنت لفترات طويلة.



الشكل 13: نتائج اختبار الوزن

تُظهر نتائج اختبار الامتصاص أن الزيادة في الكتلة المطلقة للماء المشبع مقابل الوزن الجاف ترتفع بشكل ثابت تقريبا لخليط A إلى E ، وبالتالي فإن نسبة الامتصاص المحسوبة بالنسبة للكتلة الجافة ترتفع طفيفًا من A إلى E هذا النمط يشير إلى أن كمية الماء الممتصة بالمجمل تتغير بشكل بسيط مع زيادة نسبة الركام البركاني، كما هو موضح بالشكل (14).

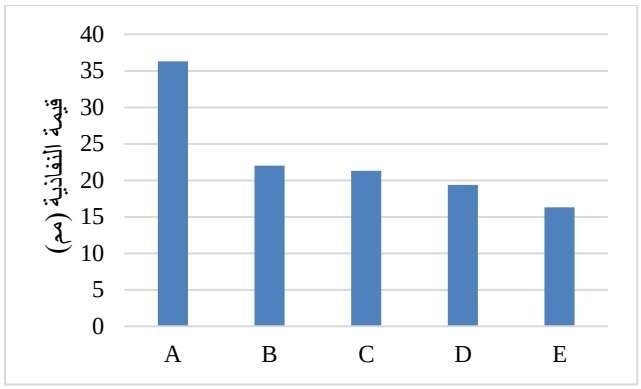


الشكل 14: نتائج اختبار الامتصاص للخرسانة الصلبة

تُظهر نتائج اختبار النفاذية وجود علاقة عكسية واضحة بين نسبة الركام البركاني داخل الخليط وقيم النفاذية الناتجة. أظهرت العينة المرجعية، العينة A أعلى نفاذية بقيمة تقارب 36.33 مم. عند إدخال الركام البركاني، يُلاحظ انخفاض كبير في النفاذية؛ تُظهر العينة B انخفاضًا ملحوظًا إلى حوالي 22 مم. يستمر هذا الاتجاه النازل باستمرار عبر العينتين C و D مع زيادة نسبة المواد البركانية. في النهاية، سجلت العينة ث التي تمثل تركيبة ركام بركاني بنسبة 100٪، أدنى نفاذية عند 16.33 مم بنسبة انخفاض تقدر ب55%. كما هو موضح في الشكل (15)

الخلاصة

تقدم هذه الدراسة تقييمًا شاملاً للركام البركاني من منطقة الهروج، مؤكدةً ملاءمته الاستثنائية للتطبيقات الإنشائية والرصفية بفضل خواصه الميكانيكية العالية، التي تتميز بمعامل تآكل لوس أنجلوس بنسبة 20.48%، ومقاومة مواتية للصدمات (18%) والسحق (23%). في حين أن الشكل الزاوي لجزيئات الركام قد أحدث تناقضًا في خصائص الخرسانة الطازجة - تحديدًا تقليل قابلية التشغيل مع انخفاض في الهبوط من 21 سم إلى 14 سم عند



الشكل 15: نتائج اختبار النفاذية

استبدال كامل - إلا أن هذا التشابك الهندسي ساهم في مصفوفة أكثر كثافة. ونتيجةً لذلك، أدى استخدام الركام البركاني إلى تحسينات كبيرة في قوة الضغط عبر جميع أعمار المعالجة (7 و28 و90 يومًا)، وبلغت ذروتها عند قوة تقارب 39 ميغاباسكال لمدة 28 يومًا لمزيج الاستبدال الكامل، وهي زيادة كبيرة مقارنةً بالقيمة المرجعية الأساسية التي تتراوح بين 20 و26 ميغاباسكال. وعلاوة على ذلك، أدى تعزيز الترابط السطحي والتفاعل المحتمل إلى إنشاء بنية مجهرية متفوقة ومنخفضة المسامية، ويتجلى ذلك من خلال انخفاض عمق نفاذية المياه من 36 ملم إلى 16 ملم، مما يدل على أن الكتل البركانية من الهروج هي مادة قابلة للتطبيق لإنتاج الخرسانة عالية القوة والمتينة مع تحسين مقاومة دخول العوامل البيئية.

التوصيات

1. يوصى باستخدام الركام البركاني المحلي من منطقة الهروج في إنتاج الخرسانة عالية المقاومة والمنشآت التي تتطلب متانة عالية ونفاذية منخفضة، مثل الأساسات العميقة والمنشآت البحرية وخزانات المياه، وذلك نظرًا لقوته العالية ونفاذيته المنخفضة.
2. ونظرًا لانخفاض قابلية تشغيل الركام البركاني، يُوصى باستخدام مواد فائقة التلدين في الخلطات الخرسانية للحفاظ على قوام مناسب للتشغيل دون زيادة نسبة الماء إلى الإسمنت، مما يضمن الحفاظ على المقاومة المكتسبة.
3. يُفضل غسل الركام البركاني وترطيبه جيدًا قبل الاستخدام (حتى يصل سطحه إلى حالة التشبع) للتحكم في امتصاصه لماء الخلط وضمان استقرار جودة الخرسانة الطرية.
4. يوصى بإجراء دراسات توصيف شاملة، تشمل اختبارات التمدد المتسارع، لتقييم التفاعل الكيميائي المحتمل للركام ومعرفة هل هو ركام نشط أم خامل بشكل قاطع.
5. يُنصح بإضافة مواد كيميائية أو معدنية مناسبة لتحسين تصميم الخلطة وتعزيز الخواص الميكانيكية ومتانة الخرسانة.

البحوث المستقبلية

1. إجراء دراسة جدوى اقتصادية لمقارنة تكاليف استخراج ونقل الركام البركاني من منطقة الهروج مع تكاليف الركام الخشن، لتحديد الجدوى الاقتصادية لتطبيقه التجاري على نطاق واسع.
2. دراسة تأثير استخدام الركام البركاني على خصائص أخرى مثل مقاومة الانحناء، ومقاومة الحريق، والعزل الحراري والصوتي.

3. دراسة جدوى طحن مخلفات تكسير الصخور البركانية واستخدامها كمادة مضافة لتحسين خصائص الأسمنت.
4. دراسة السلوك طويل الأمد (أكثر من 90 يومًا) للخرسانة البركانية في ظل ظروف بيئية قاسية (مثل هجوم الكبريتات والكربنة).

Author Contributions: "**Yahya**: Conceptualization and methodology, writing—original draft preparation, review and editing. **Al-Kartihi**: Data collection. **Yahya and Al-Kartihi**: results' analysis and discussion. Both authors have read and agreed to the published version of the manuscript."
Funding: "This research received no external funding."
Data Availability Statement: "No data were used to support this study."
Conflicts of Interest: "The authors declare that they have no conflict of interest."

References

[1] M. Aqila, and F. Farouj. "Effect of Mixing Ratios Using Local Pozzolana as a Partial Cement Replacement on Plastic Cracking in Cement Mortar." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 92-97, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_10

[2] K. Al-Zboon, and J. Zou'by. "Natural Volcanic Tuff for Sustainable Concrete Industry." *Jordan Journal of Civil Engineering*, vol. 11, no. 3, 2017. http://jjce.just.edu.jo/issues/paper.php?p=3203

[3] A. Biçer. "Thermal and Mechanical Properties of Concretes with Porous Aggregates." *International Journal of Innovative Engineering Applications*, vol. 5, no. 2, pp. 145-151, 2021. https://doi.org/10.46460/ijiea.933330

[4] A. Abutaqa, M. Mohsen, M. Aburumman, A. Senouci, R. Taha, W. Maherzi, and D. Qtiashat. "Eco-Sustainable Cement: Natural Volcanic Tuffs' Impact on Concrete Strength and Durability." *Buildings*, vol. 14, no. 9, pp. 2902, 2024. https://doi.org/10.3390/buildings14092902

[5] M. Sarireh. "Optimum Percentage of Volcanic Tuff in Concrete Production." *Yanbu Journal of Engineering and Science*, vol. 18, no. 1, pp. 43-50, 2021. https://doi.org/10.53370/yjes.vol18.iss1.6

[6] A. Blash, A. Altlomate, F. Alatshan, and A. Al-Sharif. "Properties of Concrete Produced Using Locally Available Aggregates in Libya." 2017. https://www.researchgate.net/publication/322055615

[7] M. Gil-Ortiz, N. McDougall, P. Cabello, M. Marzo, and E. Ramos. "Sedimentology of a "Nonactualistic" Middle Ordovician Tidal-Influenced Reservoir in the Murzuq Basin (Libya)." *AAPG Bulletin*, vol. 103, no. 9, pp. 2219-2246, 2019. https://doi.org/10.1306/02051917227

[8] F. Farouj, and E. Al-zwai. "The Effect of Burning Time of Pozzolana Southern Libya on the Properties of Concrete." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, pp. 24-29, 2025. https://waujpas.com/index.php/journal/article/view/101

[9] J. Bawab, H. El-Hassan, A. El-Dieb, and J. Khatib. "Synergetic Impact of Volcanic Ash and Calcium Carbide Residue on the Properties and Microstructure of Cementitious Composites." *Construction and Building Materials*, vol. 439, pp. 137390, 2024. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137390

[10] S. Çetin. "An Experimental Study of Basalt Aggregate Concrete According to Different Size Effect Laws." *Alexandria Engineering Journal*, vol. 120, pp. 358-370, 2025. https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.01.034