Wadi Alshatti University Journal of
Pure and Applied Sciences

مجلة جامعة وادي الشاطئ
للعلوم البحتة والتطبيقية

Volume 3, No. 2, July-December 2025 Online ISSN: 3006-0877 المجلد 3، الاصدار 2، يوليو-ديسمبر 2025

RESEARCH ARTICLE CIVIL ENGINEERING

Effect of Mixing Ratios Using Local Pozzolana as a Partial Cement Replacement on Plastic Cracking in Cement Mortar

Mohammed Aqila[1,*], Fouad Farouj[1]

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Wadi Al-Shati University, Brak, Libya

ARTICLE HISTORY
Received 30 April 2025
Revised 26 May 2025
Accepted 29 May 2025
Online 30 May 2025

KEYWORDS
Plastic shrinkage;
Pozzolana;
water-cement ratio;
cracking;
hot weather.

ABSTRACT

Premature cracking during the plasticization stage is an undesirable phenomenon in concrete, causing subsequent problems in the durability and structural performance of structures. The term "plastic shrinkage cracking" is used to describe cracks that form in concrete between the moment of pouring and the moment of setting. The objective of this research is to investigate the effect of different mixing ratios and the use of pozzolana as a partial cement replacement, in addition to the effect of water-to-cement ratios on the formation of plastic shrinkage cracks, particularly in hot and dry environments with high evaporation rates. Experiments were conducted on cement mortar mixes with water-to-cement ratios of 0.45, 0.60, and 0.80, and with pozzolana replacement ratios of 0%, 10%, 20%, and 30%. The results showed that increasing the water-to-cement ratio significantly increased plastic shrinkage cracking, especially in reference plots, while adding pozzolana at a rate of 10% helped reduce cracking and improve the cohesion of the mixture. As the pozzolana ratio increased to 20% and 30%, a slight increase in cracking was observed, indicating that higher than the ideal ratio may lead to adverse results. The study recommends using 15% pozzolana as a partial cement replacement to achieve the best balance between reducing cracking and improving concrete performance in harsh environmental conditions.

تأثيرنسب الخلط مع استخدام البوزلانا المحلية كبديل جزئي للأسمنت على التشققات اللدنة في المونة الأسمنتية

محمد عقيلة[1,*]، فؤاد فروج [1]

الملخص

يعد التشقق المبكر خلال مرحلة اللدونة من المظاهر غير المرغوب فيها في الخرسانة، حيث يسبب مشكلات لاحقة في المتانة والأداء الهيكلي للمنشآت. ويستخدم مصطلح " تشققات الانكماش اللدن " لوصف الشقوق التي تتشكل في الخرسانة بين لحظة الصب ولحظة التصلب. يتمثل هدف هذا البحث في دراسة تأثير نسب الخلط المختلفة واستخدام البوزلانا كبديل جزئي للأسمنت، بالإضافة إلى دراسة تأثير الماء إلى الأسمنت على تشكل تشققات الانكماش اللدن، خصوصا في البيئات الحارة والجافة التي يزيد فيها معدل التبخر. تم إجراء تجارب على خلطات المونة الأسمنتية بنسب ماء إلى أسمنت بنسب (0.45-0.60-0.80) وبنسب استبدال للبوزلانا بلغت (0%،10%،20%،30%). أظهرت النتائج أن زيادة نسبة الماء إلى الأسمنت تؤدي إلى زيادة ملحوظة في تشققات الانكماش اللدن، خاصة في الخطات المرجعية، في حين أن إضافة البوزلانا بنسبة 10% ساعدت في تقليل التشققات، وتحسين تماسك الخلطة. ومع زيادة نسبة البوزلانا إلى 20% و30%، لوحظ زيادة طفيفة في التشققات، ما يشير إلى أن زيادة النسبة عن الحد المثالي قد تؤدي إلى نتائج عكسية. توصي الدراسة باستخدام 15% من البوزلانا كبديل جزئي للأسمنت لتحقيق أفضل توازن بين تقليل التشققات وتحسين أداء الخرسانة في الظرف البيئية الصعبة.

الكلمات المفتاحية

الانكماش اللدن
البوزلانا
نسبة ماء للأسمنت
التشققات
الطقس الحار

المقدمة

تتجه رؤية العالم نحو التنمية المستدامة في جميع المجالات، وخصوصاً في كل ما يتعلق بانبعاثات ثاني أكسيد الكربون [1] [2]. لهذا الامر، توجه العديد من الباحثين بتطوير وتحسين أنواع بدائل الاسمنت، نظراً لمساهمة صناعة الاسمنت بما يقارب 5-8% من إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمي خلال مراحل تصنيعه [3] [4] [5]. وقد ظهرت البوزلانا على نطاق واسع كبديل واعد لإسمنت لتحقيق الاستدامة في تكنولوجيا الخرسانة. ويمكن استخدامها كبديل جزئي للإسمنت. وتعتبر البوزلانا مادة طينية مكلسة تحتوي على نسبة عالية من الكاولينيت الطيني المعدني، والذي يمتاز بانبعاثات أقل من ثاني أكسيد الكربون أثناء التكليس. وذلك بفضل انخفاض محتواها من الجير وانخفاض درجة حرارتها. يُحضّر الطين المُكلّس من خلال المعالجة الحرارية لطين الكاولينيت عند درجات حرارة تقارب 800 درجة مئوية، مما يؤدي إلى تحوّله إلى الميتاكاولين، وهو شكل لا مائي من الكاولينيت يمتاز بنشاط بوزولاني مرتفع يجعله مثالياً للاستخدام كمادة إسمنتية مكمّلة [6]. ويستخرج الطين المكلس في الغالب من مصادر محلية، كونه مادة طبيعية قد لا تستخدم أو تستغل بشكل كاف [7] [8] [9]. ويساهم

*Corresponding author
https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_10

استخدامه كمواد اسمنتية تكميلية في كفاءة استخدام الموارد في البناء، وقد تم اعتماده على نطاق واسع في مختلف دول العالم [10] [11]. كما يؤدي إضافة مادة البوزلانا إلى انتاج مصانع الاسمنت سيخفض 15 مليون طن من انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون سنوياً الناتج من مصانع الاسمنت. وفقاً لدراسات منظمة ECOSMART الكندية [12]. مما يجعلها بديلاً فعالاً ومستداماً للإسمنت البورتلاندي، ومجدياً بيئياً من خلال انخفاض الطاقة المتضمنة في صناعة الاسمنت. ومن هذا المنطلق، تم تسيط الضوء من قبل الباحثين على العديد من الخصائص البوزلانية من ضمنها الانكماش اللدن، يعد الانكماش من أكثر خصائص ضررا ومن المشاكل القديمة التي تواجه الخرسانة. فإلى جانب تأثيرها السلبي على الجانب الجمالي، فإنها تمثل نقاط ضعف محتملة تسهم في زيادة فرص التآكل أو كقنوات لدخول مسرع للعوامل البيئية الضارة مما يقلل من متانتها. بشكل خاص، تعد الخرسانة الطازجة معرضة لخطر تشققات الانكماش اللدن، والتي تنشأ ما بين زمن الصب وبداية التصلب الأولي [13] [14] وتعد الظروف المناخية الحارة، مثل ارتفاع درجة حرارة الهواء، وانخفاض الرطوبة النسبية، وزيادة سرعة الرياح، وشدة الإشعاع الشمسي، من أبرز العوامل التي تؤثر بشكل مباشر على خصائص الخرسانة في حالتها الطازجة والمتصلدة. ويكمن الخطر الأساسي للبناء في مثل هذه الظروف، إذا لم تتخذ الإجراءات الوقائية المناسبة، في ارتفاع درجة حرارة الخرسانة الطازجة. إذ يؤدي هذا الارتفاع، خاصة عند اقترانه بانخفاض درجة حرارة الجو المحيط، وقلة الرطوبة، أو ارتفاع سرعة الرياح، إلى تسارع معدل تبخر الماء من سطح الخرسانة حديثة الصب، مما يرفع من احتمالية حدوث تشققات انكماشية لدنة [15]. ويعزي السبب الرئيسي لهذه التشققات في خرسانة الأسمنت البورتلاندي إلى معدل تبخر الماء الزائد والسريع من سطح الخرسانة ، مع عدم كفاية ماء النزف لتعويض الكمية المتبخرة [16]. ومن الحلول التي طرحها خبراء الخرسانة للتقليل من اثار الظروف المناخية الحارة، اعتماد مواد إسمنتية بوزولانية، مثل دخان السيليكا، والرماد المتطاير، وخبث أفران الصهر، أو البوزلانات الطبيعية، وذلك لما توفره من فوائد تقنية واقتصادية وبيئية [17]. وفي هذا السياق، يعد البوزلان الطبيعي أحد الخيارات الفعالة، إذ يتكون من مسحوق بركاني غني بالمركبات السيليسية أو السيليسية – الألومينية، وقد استخدم منذ القدم كمادة مضافة لتحسين أداء الخرسانة. ويتفاعل هذا المكون مع هيدروكسيد الكالسيوم الناتج عن ترطيب الأسمنت لينتج مركبات CSH، التي تسهم في زيادة كثافة الخرسانة، وتقليل مساميتها، مما يعزز مقاومتها للظروف المناخية القاسية ويحسن من متانتها [18].أثبتت دراسة تجريبية تأثير تركيب الخلطة الخرسانية بشكل ملحوظ على الانكماش اللدن في البيئات الحارة القاحلة، حيث ازداد كل من النزيف ومعدل التبخر بزيادة نسبة الماء إلى الأسمنت ومحتوى الأسمنت. لاحظت الدراسة أن الخلطات قليلة الصلابة أظهرت نزيفًا أقل وتشققًا مبكرًا ولكن بشدة أقل مقارنة بالخلطات الغنية باللدائن. وخلصت النتائج إلى أن خلطة تحتوي على 300 كجم/م^3 من الأسمنت ونسبة ماء إلى أسمنت 0.40 تعد أكثر ملاءمة لتقليل تشققات الانكماش اللدن. كما أشارت الدراسة إلى أن تشقق الانكماش قد يحدث عند معدلات تبخر أقل من القيم المحددة في معايير ACI 305 ، مما يستدعي إعادة النظر في هذه القيم عند تصميم الخرسانة في البيئات القاحلة [16].وكما اجري بحث تجريبي لدراسة تأثير ثلاثة عوامل رئيسية على الانكماش الأولي لأسمنت بورتلاند والأسمنت عالي المقاومة للكبريتات، وهي: نسبة الماء إلى الأسمنت، ومحتوى الملدن الفائق MC-PowerFlow PF) (7951 ومحتوى الميتاكاولين كبديل جزئي للأسمنت. وأظهرت النتائج أن زيادة نسبة الماء إلى الأسمنت أدت إلى ارتفاع ملحوظ في الانكماش، خاصة في الأسمنت عالي الأليت والألومينات مقارنة بالأسمنت عالي البيليت والسيليت. كما تبين أن إضافة الملدن الفائق تزيد من الانكماش لكلا النوعين من الأسمنت، مع تقارب قيم الانكماش بينهما عند استخدام نسب أعلى من الملدن. من جهة أخرى، ساهم استبدال جزء من الأسمنت بالميتاكاولين في خفض الانكماش الأولي، وكان تأثيره أوضح على الأسمنت عالي الأليت. أوصت الدراسة بإجراء أبحاث إضافية لاستكشاف تأثير هذه العوامل على الخرسانة المتماسكة بالرماد المتطاير [19].

أهمية البحث

يهدف هذا البحث إلى تحليل وتقيم تأثير نسب الخلط المختلفة، تحديدا نسبة الماء إلى الأسمنت، مع استخدام مادة البوزلانا كبديل جزئي للأسمنت على تطور تشققات الانكماش اللدن في الخرسانة المعرضة لظروف بيئية حارة وجافة. كما يهدف إلى تحديد النسبة المثلي من إضافة البوزلانا التي تسهم في تحسين مقاومة الخرسانة للتشققات المبكرة وتقليل معدل التبخر، مما يعزز من جودة الخرسانة ومتانتها في المراحل الأولية من عمرها الإنشائي. إضافة إلى ذلك، يسعى البحث إلى تحديد أفضل نسبة ماء إلى اسمنت في الخلطات المرجعية لتحقيق توازن مثالي بين قابلية التشغيل وتقليل الانكماش اللدن، وتقديم توصيات عمليات قابلة للتطبيق في مشاريع البناء الواقعة ضمن بيئات مناخية قاسية.

منهجية البحث

تنقسم هذه الدراسة الى جزئين الجانب النظري والجانب العملي: -

الجانب النظري

في هذه المرحلة، تم تجميع المعلومات الكافية والحديثة حول موضوع البحث من خلال استعراض الدراسات السابقة، بما في ذلك البحوث والرسائل والأوراق العلمية المنشورة. يمثل هذا العمل جزءًا من دراسة، حيث لا يزال البحث جاريًا لاستكمال تحليل العوامل المتعددة التي تؤثر على ظاهرة الانكماش. وقد ركزت هذه الدراسات بشكل خاص على تأثير نسب الخلط مع استخدام البوزلانا كبديل جزئي للأسمنت على التشققات اللدنة في الخرسانة. وتُعد دراسة هذه العوامل تمهيدًا لبحث مستقبلي يهدف إلى تعميق الفهمين النظري والتطبيقي لظاهرة الانكماش ضمن ظروف تشغيلية مختلفة.

الجانب العملي

تم الحصول على البوزلانا الطبيعية المحلية من الموقع تمهنت، حيث خضعت لعملية تكسير أولي إلى أحجام صغيرة مناسبة، تلتها عملية معالجة حرارية استمرت لمدة ساعتين عند درجة حرارة 800درجة مئوية. بعد ذلك، تم طحن العينة إلى أن وصلت إلى مستوى النعومة المطلوب، بحيث تمر عبر منخل 90ميكرومتر (µm). جدول(1) يوضح تحليل الكيميائي لعينة تمهنت.

أما الركام الناعم فقد تم توريده من رمال زلاف، وأجريت عليه اختبارات معملية للتحقيق من مدى توافقه مع المواصفات الفنية المعتمدة.

تم استخدام الإسمنت البورتلاندي العادي المنتج من مصنع البرج (زليتن)، وهو من الأنواع المتداولة محليًا ويتوافق مع المواصفات القياسية المعتمدة.

الجدول 1: تحليل الكيميائي لعينة تمنهنت [20]

العنصر	النسبة المئوية (%)
SiO_2	68.85
Al_2O_3	20.26
Fe_2O_3	1.98
Ttal ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$)	91.09
CaO	6.53
SO_3	0.0
K_2O	0.0
MgO	0.0
TiO_2	0.67
Cl^-	0.0
Na_2O	0.48

فيما يتعلق بأعمال القوالب، تم تصنيع قوالب خشبية يدويًا بأبعاد (2.5 × 50 × 50) سم، وذلك لاستخدامها في عمليات الصب وإجراء الاختبارات اللاحقة. وقد تم تصميم هذه القوالب بأبعاد مناسبة لقياس الانكماش الطولي بدقة، استنادًا إلى متطلبات اختبار الانكماش، وليس وفق مواصفة قياسية محددة. تم اعتماد هذه الأبعاد لتحقيق توازن بين تقليل الكميات المستخدمة من البوزلانا، والحفاظ على وضوح النتائج التجريبية ودقتها.

قمنا بتصميم خلطات المونة الإسمنتية مع إضافة البوزلانا المحلية كبديل جزئي للإسمنت بنسب متفاوتة (0-10-20-30) % وكذلك نسبة الماء للإسمنت بنسب مختلفة (0.45-0.60-0.80). وجدول (2) يوضح الرموز المختصرة للعينات.

الجدول 2: الرموز المختصرة للعينات

W\C	نسبة البوزلانا			
	%0	%10	%20	**%30**
0.45	A0	A10	A20	**A30**
0.60	B0	B10	B20	**B30**
0.80	C0	C10	C20	**C30**

الاختبارات المعملية

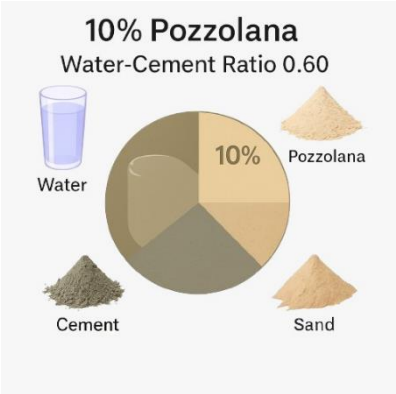
تم توريد كافة مكونات الخلطة الإسمنتية الى موقع العمل، حيث تم إجراء عملية الخلط والصب داخل القوالب الخشبية تحت ظروف جوية متجانسة، بلغت خلالها درجة حرارة الجو 36درجة مئوية، وسرعة الرياح 17كم/س، بينما سجلت الرطوبة النسبية 12%.

تم أخذ ثلاث عينات لكل حالة، وتم احتساب المتوسط بين القراءات الثلاث للحصول على نتائج أكثر دقة.

تضمنت الدراسة استخدام نسب استبدال مختلفة من البوزلانا الطبيعية بدلاً من الاسمنت البورتلاندي، وفق نسب مختلفة:0%،10%،20%،30% من الوزن الكلي للأسمنت.

تم تنفيذ عملية الخلط الجاف أولا لضمان تجانس مكونات الخلطة، خاصة من حيث توحيد اللون بين البوزلانا، والأسمنت، والرمل. وقد تم اعتماد نسبة أسمنت إلى الرمل تعادل (3:1)، وذلك وفقا للمعايير والمواصفات الفنية المعتمدة.

علاوة على ذلك، تم استخدام ثلاث نسب مختلفة من الماء إلى الأسمنت لكل خلطة في الخلطات المختبرة، وهي: 0.45، 0.60، 0.80 وذلك بهدف دراسة تأثير نسبة الماء إلى الأسمنت على خصائص الخلطة. الشكل (1) يوضح مكونات العينة B10 والشكل (2) يوضح الخلطات المختبرة.

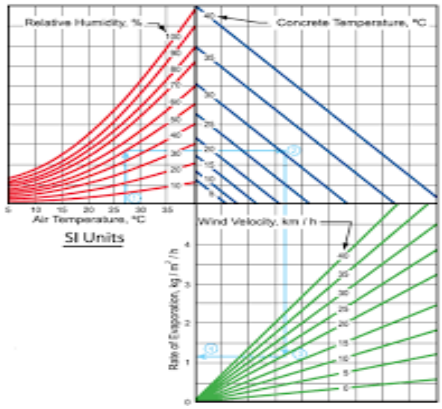


الشكل 1: مكونات الخلطة B10

الشكل 2: الخلطات مختبرة

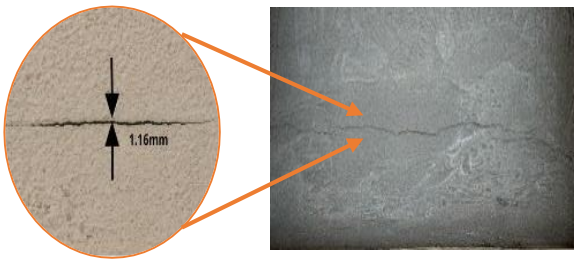
مناقشة النتائج

تم عرض نتائج العينات المدروسة في مخططات، ومقارنتها بالعينة المرجعية التي تحتوي فقط على الإسمنت البورتلاندي العادي. كما شملت المقارنة خلطات التي تحتوي على نسب مختلفة من البوزلانا، بالإضافة إلى اختلاف نسب الماء إلى الأسمنت. تم استخراج البيانات من الموقع العمل، وشملت النتائج ما يلي: - درجة حرارة الخرسانة، زمن ظهور أول تشقق، طول التشقق، عرض التشقق، معدل التبخر، وقد تم حساب معدل التبخر بناء على درجة حرارة الجو، وسرعة الرياح، والرطوبة، ودرجة حرارة الخلطة، وذلك باستخدام مخطط يعتمد على المواصفات العالمية كما موضح في شكل (3).

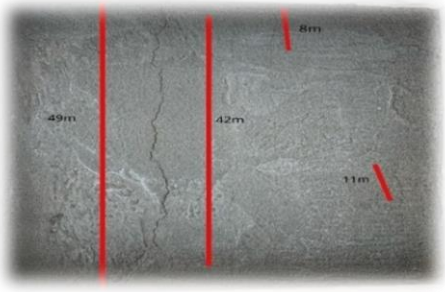


الشكل 3: منحنى قياس معدل التبخر [21]

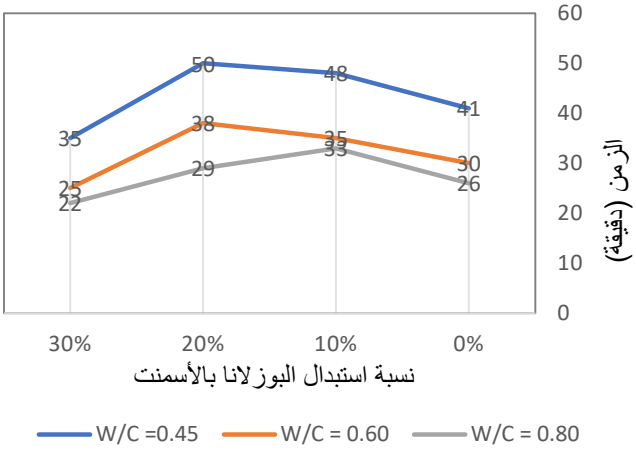
أما بالنسبة لطول التشققات، فقد تم قياس الأطوال الموجودة على سطح العينة، ثم أخذ متوسط هذه الأطوال للحصول على القيمة التمثيلية. وبالمثل، تم حساب عرض التشققات، وحساب زمن أول ظهور التشقق والشكل (4) يوضح عرض التشقق والشكل (5) يوضح اطوال التشقق. تشير الأشكال من (6) إلى (9) إلى المخططات البيانية التي توضح نتائج الدراسة.



الشكل 4: عرض التشقق



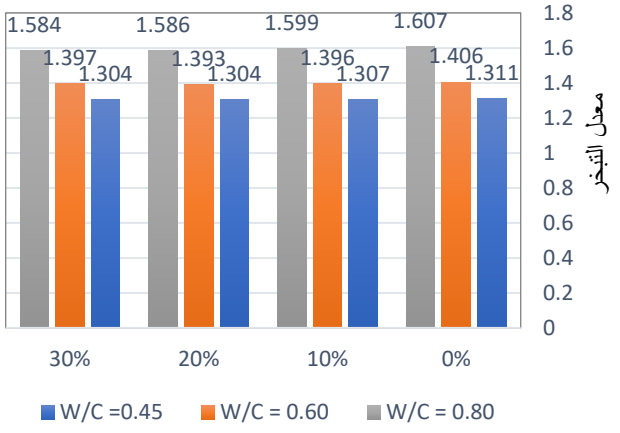
الشكل 5: اطوال التشققات



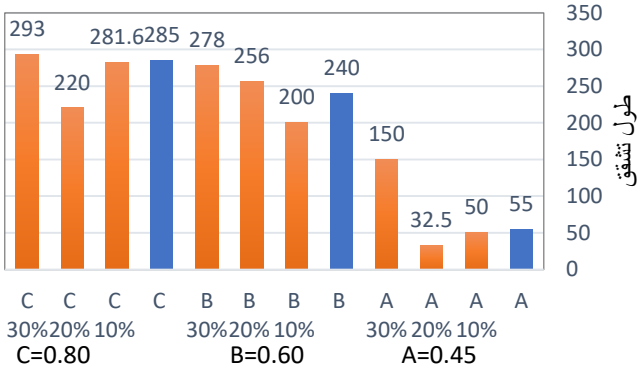
الشكل 6: زمن أول ظهور التشققات (دقيقة)ا

بالنسبة لظهور التشققات في العينات، فقد تبين بشكل واضح أن زمن ظهور أول تشقق يزداد مع انخفاض نسبة الماء إلى الأسمنت، وكانت هذه الزيادة ملحوظة عند نسب 0%و10%و20%. أما عند زيادة نسبة البوزلانا إلى 30%، فقد لوحظ أن زمن ظهور أول تشقق يقل في جميع العينات المدروسة. ويمكننا من ذلك استخلاص النتيجة التالية: إن كمية المياه في العينة تؤثر بشكل واضح على توقيت ظهور أول تشقق، حيث إن زيادة كمية المياه تؤدي إلى ظهور التشققات في وقت أبكر، خاصة في الأجواء الحارة والجافة. كما أن زيادة كمية البوزلانا لها تأثير إيجابي في الحد من هذه الظاهرة.

بالنسبة لمعدل التبخر، فقد تبين أنه ثابت تقريبا لجميع العينات التي أجريت عليها التجارب، وذلك بمختلف نسب الماء إلى الأسمنت. وقد أظهرت النتائج أن معدل التبخر تغير بنسب طفيفة جدا لا تتجاوز 1%، مما يشير إلى ثباته سواء مع إضافة البوزلانا أو بدونها. ويعزى هذا الثبات إلى درجة حرارة الجو المحيط، إذ يزداد معدل التبخر في درجات الحرارة العالية لجميع العينات، ويمكن رصد هذا الفرق بشكل أوضح بدرجات الحرارة المعتدلة، في فصل الشتاء.

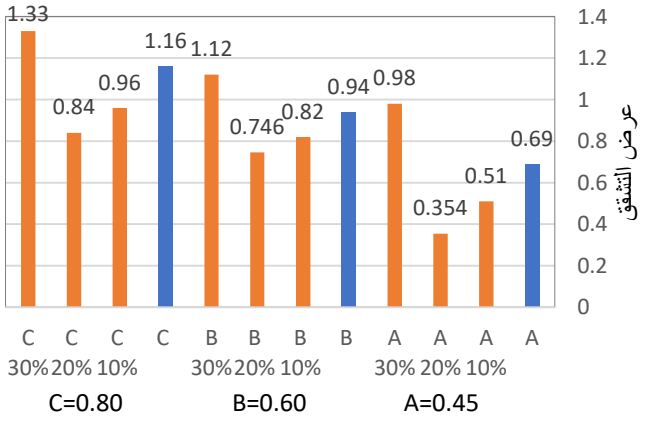


الشكل 7: معدل التبخر كجم/(م²·س)



الشكل 8: طول التشققات (مم)

بالنسبة لطول التشققات، يلاحظ بشكل واضح أن إضافة مادة البوزلانا إلى العينات المدروسة بنسبة 10% و20% أدت إلى انخفاض في طول التشققات، وذلك في العينات التي تحتوي على نسبة منخفضة من الماء إلى الأسمنت. أما في العينات الأخرى، فقد لوحظ ازدياد في طول التشققات. ويلاحظ بوضوح أن زيادة نسبة الى 30% تسببت في ارتفاع ملحوظ في طول التشققات.



الشكل 9: عرض التشققات (مم)

بالنسبة لعرض التشققات، يلاحظ بشكل واضح أن إضافة مادة البوزلانا إلى العينات المدروسة بنسبة 10% و20% أدت إلى انخفاض في لعرض التشققات، وذلك في العينات التي تحتوي على نسبة منخفضة من الماء إلى الأسمنت. أما في العينات الأخرى، فقد لوحظ ازدياد في عرض التشققات. ويلاحظ بوضوح أن زيادة نسبة الى 30% تسببت في ارتفاع ملحوظ في عرض التشققات.

الخلاصة

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل خصائص الانكماش في الخرسانة في حالتها اللدنّة، من خلال استخدام المواد البوزلانية المحلية المتماثلة. وقد اعتمدت الدراسة على مواقع تمنهنت. تم في هذه الدراسة إحلال جزء من الأسمنت البورتلاندي العادي بنسب مختلفة من هذه المواد المستخلصة، وأيضا بنسب مختلفة من كمية ماء إلى الأسمنت ومن ثم تقييم تأثيرها على خصائص الخلطات المدروسة. أظهرت النتائج أن إضافة هذه المواد كان لها تأثير إيجابي ملحوظ على معظم الخلطات الخرسانية، وأسفرت عن نتائج جيدة تؤكد فاعلية هذه الطريقة. توصلت هذه الدراسة إلى النتائج الآتية.

ظهرت النتائج أن معدل التبخر يزداد مع زيادة نسبة ماء الخلط إلى الأسمنت، بينما يؤدي استخدام البوزلانا المحلية كمادة مضافة إلى تقليل معدل التبخر. سُجِّلت أعلى قيمة لمعدل التبخر عند الخلطة رقم(C0)، في حين كانت أقل من القيمة عند الخلطة رقم (A0) لنسبة لزمن ظهور أول تشقق، فقد ظهر أول تشقق في الخلطة (C0) بعد مرور 22 دقيقة، بينما تأخر ظهور أول تشقق في الخلطة (A10) حتى 50دقيقة ومن خلال النتائج، لوحظ أن زيادة نسبة ماء الخلط إلى الأسمنت تؤدي إلى زيادة معدل الانكماش المبكر للخرسانة. ومن خلال النتائج، لوحظ أن زيادة نسبة ماء الخلط إلى الأسمنت تؤدي إلى زيادة معدل الانكماش المبكر للخرسانة.

يُمكن الاستفادة من استخدام المواد البوزلانية الطبيعية، مثل الطين، بعد معالجتها حرارياً وطحنها إلى درجة مناسبة، وذلك بإدخالها في إنتاج الخرسانة لتحقيق بعض الأهداف المرجوة، مثل تقليل تكلفة الإنتاج وتحسين جودة الخلطة. كما تساهم هذه المواد في تعزيز بعض خصائص الخرسانة، كخفض معدل فقدان الماء، وتأخير ظهور التشققات الناتجة عن انكماش اللدن، إضافةً إلى الحد من توسعها، مما يؤدي إلى تحسين متانة الخرسانة بشكل عام.

كلما زادت كمية ماء للأسمنت يزداد التشقق وبتالي ينتج عنه زمن اول ظهور للتشقق أفضل نسبة ماء الي الأسمنت بين 0.45 و0.60

استخدام نسبة الإحلال تتراوح بين 10% الى 20% من الميتاكاولين في المونة الاسمنتية.

التوصيات

1- نظرًا لأهمية المواد البوزلانية المحلية في تحسين خصائص الخرسانة، يُوصى بإجراء مزيد من البحوث والدراسات المتعمقة حول تأثير هذه المواد على خصائص أخرى مثل الانكماش الجاف، والمرونة، والزحف، والنفاذية، وغيرها من الخصائص التي تؤثر في أداء الخرسانة على المدى الطويل. إن دراسة هذه التأثيرات بشكل شامل سيسهم في تحسين فهمنا لكيفية استفادة الخلطات الخرسانية من المواد البديلة، وبالتالي تعزيز استدامة المنشآت وتقليل التكاليف المرتبطة بالصيانة والتقوية المستقبلية.

2- يوصى باستخدام نسبة ماء إلى أسمنت تتراوح بين 0.45 و0.60 للحصول على أفضل أداء للخرسانة من حيث المتانة والصلابة.

3- يوصى باستخدام نسبة إحلال من الميتاكاولين تتراوح بين 10% إلى 20% في المونة الأسمنتية لتعزيز الخصائص الميكانيكية وتحسين أداء الخرسانة. يوصى إعادة تقييم نسب الخلط للخرسانة عبر دمج البوزلانا المحلية كبديل جزئي للمواد الأسمنتية ويُقترح توسيع نطاق الدراسة ليشمل أنواعًا متعددة من الأسمنت، وليس الاقتصار على الإسمنت البورتلاندي العادي.

4- يوصى بجمع عينات من البوزلانا من مواقع مختلفة ودراسة تأثيرها على خصائص الخرسانة، بهدف تقييم مدى اختلاف تأثيرها على المتانة، والزحف، والانكماش، والمقاومة للتآكل، وذلك لتحسين استخداماتها في التطبيقات الهندسية المختلفة.

Author Contributions: "All authors have made a substantial and direct intellectual contribution to the work and approved its publication".

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] J. Min, G. Yan and A. Abed. "The effect of carbon dioxide emissions on the building energy efficiency." *Fuel*, vol. 326, no. 10, p. 124842, 2022, https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124842

[2] Y. Nassar, K. Rateb and S. Alsadi. "Air Pollution Sources in Libya." *Research & Reviewrs Journal of Ecology and Environmental Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 63-79 2018. https://www.researchgate.net/publication/323526028

[3] S. Nie a, J. Zhou a, and F. Yang, "Analysis of theoretical carbon dioxide emissions from cement production: Methodology and application," *J. Clean. Prod.*, vol. 334, p. 130270, 2022, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130270

[4] M. Zahirul Khaiyum and S. Sarker, "Evaluation of Carbon Emission Factors in the Cement Industry: An Emerging Economy Context," *Sustainability*, vol. 21, p. 15407, 2023. https://doi.org/10.3390/su152115407

[5] O. Alobaydy, "Impacts of Cement Production on the Environment with Practical Solutions: A critical review,". J. *Res. Technol. Eng*, vol.2, p. 12-27, 2024. https://www.researchgate.net/publication/380210555

[6] M. Wyrzykowski, "Plastic shrinkage of concrete made with calcined clay-limestone cement.". *Cement and Concrete Research*.vol.189, p. 107784, 2025. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.107784

[7] H. M. Hamada a b and F. Abed a, "Effect of Volcanic Ash and Natural Pozzolana on mechanical properties of sustainable cement concrete: A comprehensive review,". Case Studies in Construction Materials vol. 19, p. 2425, 2023, https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02425

[8] H. Wang b and X. Liu, "Pozzolanic activity evaluation methods of solid waste: A review,". *J. Clean. Prod.*,vol. 402, p.136783 2023, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136783

[9] G. A. A.a and A. M. O, "Insights on Sarooj: Oman's Traditional Pozzolan,". *Second International Conference on Advances in Cement and Concrete Research*,, 2023. https://www.researchgate.net/publication/380428118

[10] M. Abdulqader a and H. R. Khalid, "Physicochemical properties of limestone calcined clay cement (LC3) concrete made using Saudi clays,". *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 25, p. 2769-2783 ,2023,: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.114

[11] J. Mwiti Marangu and K. Riding, "Potential for Selected Kenyan Clay in Production of Limestone Calcined Clay Cement," 2020. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-2806-4_3

[12] A. A.-Q. Yahya Abu Saiba, "A reference study on the possibility of substituting some materials as a partial alternative to cement with concrete in Libya.". *The 4th international conference of Sciences and Technology*,vol.20, p.1722, 2021. https://doi.org/10.51984/jopas.v20i4.1722

[13] P. Lura, "Influence of Shrinkage Reducing Admixtures on the Development of Plastic Shrinkage Cracks,". *ACI Materials Journal*, vol.104, p. 187-194, 2007. https://www.researchgate.net/publication/266079850

[14] I. M. G. Bertelsen, L. M. Ottosen, and G. Fischer, "Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 230, p. 116769, Jan. 2020. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116769.

[15] M. . Maslehuddin, "Effect of curing methods on shrinkage and corrosion resistance of concrete,". *Construction and Building Materials*,vol.41, p. 634-641, 2013. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.064

[16] A. .A Almusallam and M. Maslehuddin, "Effect of mix proportions on plastic shrinkage cracking of concrete in hot environments", *Construction and Building Material*s, vol.12, p. 353-358, 1998. https://doi.org/10.1016/S0950-0618(98)00019-1

[17] M. Nasir, "Effect of placement temperature and curing method on plastic shrinkage of plain and pozzolanic cement concretes under hot weather,". *Construction and Building Materials*, p. 943-953, 2017. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.068

[18] S. Ahmad, "Influence of admixing natural pozzolan as partial replacement of cement and microsilica in UHPC mixtures,". *Construction and Building Materials*, vol. 198, p. 437-444, 2019. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.260

[19] K. Usanova, "Plastic shrinkage of concrete modified by metakaolin,". Magazine of Civil Engineering, vol. 103, p. 2712-8172, 2021. http://engstroy.spbstu.ru

[20] R. Taher, "Effect of adding local pozzolana on different types of cement.,". Wadi Al-Shati University, Sabha, Libya, 2024.

[21] A. Akasha, Concrete Technology (1st ed.), *Sabha University Publications*. p.155, 2013.

.