Wadi Alshatti University Journal of
Pure and Applied Sciences

مجلة جامعة وادي الشاطئ
للعلوم البحتة والتطبيقية

Volume 3, No. 1, January-June 2025 Online ISSN: 3006-0877 المجلد 3، الاصدار 1، يناير-يونيو 2025

RESEARCH ARTICLE **CIVIL ENGINEERING**

Effectiveness of Calcium Hydroxide as an Alkaline Activator of Geopolymer Mortar

Amer Saidy[1*], Fouad Farouj[1]

[1]Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Wadi Alshatti University, Brack, Libya

ARTICLE HISTORY
Received 25 June 2025
Revised 18 July 2025
Accepted 19 July 2025
Online 20 July 2025

KEYWORDS
Geopolymer;
Calcium hydroxide;
Metakaolin;
Pozzolan;
Sustainability.

ABSTRACT

The construction industry is facing growing environmental challenges due to its heavy reliance on Portland cement, which accounts for approximately 8% of global CO_2 emissions and consumes substantial amounts of energy and natural resources. In light of these concerns, geopolymer technology has emerged as a promising and sustainable alternative. Geopolymers are inorganic binders formed by the alkaline activation of aluminosilicate-rich materials such as metakaolin, offering significantly lower carbon emissions and favorable physical and mechanical properties. This study investigates the effect of varying calcium hydroxide ($Ca(OH)_2$) content on the physical and mechanical properties of geopolymer mortar produced from locally available metakaolin in southern Libya. Experimental mixes were prepared with different $Ca(OH)_2$-to-pozzolan ratios and tested for compressive strength, water absorption, apparent density, and porosity. The results showed a non-linear relationship between $Ca(OH)_2$ content and compressive strength. The optimal mixture contained 30% $Ca(OH)_2$, achieving compressive strengths of 16.76 MPa after 7 days and 20.65 MPa after 28 days. Higher $Ca(OH)_2$ contents led to decreased performance due to increased porosity and the presence of unreacted $Ca(OH)_2$. A strong inverse correlation was observed between compressive strength and both water absorption and porosity, highlighting the critical role of microstructural integrity.This study concludes that precise control of calcium hydroxide content enhances the pozzolanic reaction and improves both the mechanical strength and durability of geopolymer mortars. The findings provide valuable scientific data for the development of eco-friendly, cost-effective construction materials and support the global movement toward sustainable development, particularly in regions with abundant local raw materials such as southern Libya.

فعالية هيدروكسيد الكالسيوم كمنشط قلوي لمونة الجيوبوليمر

عامر السعيدي [1*]، فؤاد فروج [1]

الملخص

تواجه صناعة البناء تحديات بيئية كبيرة نتيجة الاعتماد المفرط على الإسمنت البورتلاندي، الذي يسهم بحوالي 8% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون عالميًا، بالإضافة إلى استهلاك كميات ضخمة من الطاقة والموارد الطبيعية. في هذا السياق، ظهرت تكنولوجيا الجيوبوليمر كخيار بديل مستدام، يتم فيه استخدام مواد غنية بالألومينو سيليكات مثل الميتاكاولين، من خلال تفاعلها مع محاليل قلوية لتكوين روابط غير عضوية ذات خصائص ميكانيكية جيدة وبصمة كربونية منخفضة. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير محتوى هيدروكسيد الكالسيوم ($Ca(OH)_2$) على بعض الخواص الفيزيائية والميكانيكية لمونة الجيوبوليمر المنتجة من الميتاكاولين المحلي المتوفر في جنوب ليبيا، وتحديد النسبة المثلى التي تحقق أفضل توازن بين الأداء والكلفة. تم إعداد خلطات جيوبوليمرية تحتوي على نسب مختلفة من $Ca(OH)_2$ إلى البوزولان، وتم اختبارها من حيث مقاومة الضغط،درجة الامتصاص، والكثافة الظاهرية، ونسبة الفراغات. أظهرت النتائج أن العلاقة بين محتوى $Ca(OH)_2$ ومقاومة الضغط كانت غير خطية، حيث سجلت النسبة المثلى (30%) أعلى مقاومة انضغاط بلغت 16.76 ميغاباسكال بعد 7 أيام و20.65 ميغاباسكال بعد 28 يومًا. ومع ذلك، فإن الزيادة في النسبة عن هذا الحد أدت إلى انخفاض الأداء بسبب زيادة المسامية وبقاء جزء من $Ca(OH)_2$ غير متفاعل. كما لوحظ وجود علاقة عكسية قوية بين مقاومة الضغط ونسبة الفراغات. توضح النتائج أن التحكم الدقيق في كمية هيدروكسيد الكالسيوم يعد عاملاً حاسمًا لتحسين أداء الجيوبوليمر، مما يدعم تطوير مواد بناء فعالة وصديقة للبيئة، ويسهم في تقليل الانبعاثات وتعزيز الاستدامة، خاصة في المناطق التي تتوفر فيها الموارد الطبيعية المحلية مثل جنوب ليبيا.

الكلمات المفتاحية
الجيوبوليمير
هيدروكسيد الكالسيوم
الميتاكاولين
البوزولان
الاستدامة

المقدمة

تشهد صناعة البناء حول العالم تحديات بيئية واقتصادية متزايدة نتيجة الاعتماد الواسع على الإسمنت البورتلاندي، الذي يُعد مسؤولًا عن حوالي 8% من إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية، ويستهلك نحو 7% من

*Corresponding author
https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_16

الطاقة العالمية [1،2]. تعود هذه التأثيرات السلبية إلى عمليات إنتاج الإسمنت التقليدية، والتي تتطلب حرق كميات كبيرة من الحجر الجيري والطين في درجات حرارة مرتفعة تصل إلى 1450 درجة مئوية، مما يؤدي إلى استنزاف الموارد الطبيعية وزيادة تكلفة الإنتاج [3]. وفي ظل هذه الظروف، تزايد الاهتمام البحثي بالبحث عن حلول بديلة تحقق الاستدامة البيئية والاقتصادية، وكانت تكنولوجيا الجيوبوليمر إحدى أبرز هذه البدائل.

الجيوبوليمرات هي مواد رابطة غير عضوية يتم إنتاجها من خلال التنشيط القلوي للمواد الغنية بالألومينو سيليكات، مثل البوزولان الطبيعي أو الرماد المتطاير، وتتميز بعدة مزايا؛ أبرزها خفض البصمة الكربونية بنسبة تتراوح بين 40% و80% مقارنة بالإسمنت التقليدي، بالإضافة إلى إمكانية استخدام الموارد المحلية المتوفرة [4], [5]. كما تتمتع الجيوبوليمرات بخصائص ميكانيكية وهندسية متميزة من حيث مقاومة الضغط والتآكل، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات الإنشائية المتنوعة [6].

تعتمد تكنولوجيا الجيوبوليمر على تفاعل المواد الأولية المحتوية على الألومينا والسيليكا مع محلول قلوي قوي (مثل هيدروكسيد الصوديوم أو سيليكات الصوديوم)، لتكوين شبكة ثلاثية الأبعاد من البوليمرات غير العضوية. هذا التفاعل ينتج عنه مادة صلبة ذات خصائص مشابهة أو متفوقة على الإسمنت البورتلاندي من حيث القوة والمتانة ومقاومة العوامل البيئية [7]-[9]. وقد أثبتت الجيوبوليمرات فعاليتها في تقليل الانبعاثات الكربونية وتحسين الجودة البيئية للمنشآت، لا سيما عند استخدام مواد متوفرة محليًا مثل الميتاكاولين.

أظهرت دراسات حديثة أن تحسين أداء الجيوبوليمر يرتبط بشكل كبير بنوع المادة القلوية المستخدمة، حيث تم التوصل إلى أن استخدام هيدروكسيد الكالسيوم يمكن أن يعزز التفاعل القلوي ويزيد من تكوين منتجات التصلب مثل C–S–H وC–A–S–H، مما يساهم في تحسين مقاومة الانضغاط [10]-[12]. على سبيل المثال، بينت دراسة [13] أن إضافة هيدروكسيد الكالسيوم أدى إلى تحسين البنية المجهرية وزيادة الكثافة الظاهرية للجيوبوليمر. كما أظهرت الدراسة [14] أن التدرج في نسب هيدروكسيد الكالسيوم يُعد من العوامل الحاسمة في تحديد الخصائص النهائية للخرسانة الجيوبوليمرية.

ومن جهة أخرى، ركزت دراسات عديدة على أهمية استخدام الميتاكاولين المحلي كمصدر أولي لصناعة الجيوبوليمر، نظرًا لتوفره وانخفاض كلفته، بالإضافة إلى قدرته على التفاعل مع المحاليل القلوية لإنتاج روابط قوية تسهم في تحسين أداء المادة الناتجة [15-17].

ورغم هذه المزايا، لا تزال هناك بعض التحديات التي تعيق الانتشار الواسع للجيوبوليمرات، خاصة فيما يتعلق بتحسين خصائصها الفيزيائية والميكانيكية. إذ يتأثر أداء الجيوبوليمر بشكل كبير بطبيعة ونسب المكونات الداخلة في تصنيعه، خصوصًا نوع وكمية المواد القلوية المستخدمة. يُعد هيدروكسيد الكالسيوم ($Ca(OH)_2$) من المركبات الأساسية التي يمكن أن تعزز عمليات التصلب وتحسين مقاومة الضغط للجيوبوليمر، إلا أن تحديد النسبة المثلى له في الخلطات المعتمدة على البوزولان الطبيعي لم يتم بحثه بشكل كافٍ، خاصة في المناطق التي تتوفر فيها هذه المواد محليًا، مثل جنوب ليبيا.

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير نسب مختلفة من هيدروكسيد الكالسيوم على مقاومة الانضغاط، والمسامية، ودرجة الامتصاص، والكثافة الظاهرية لمونة الجيوبوليمر المنتجة من الميتاكاولين المحلي. وتسعى إلى تحديد النسبة المثلى من هيدروكسيد الكالسيوم التي تحقق أفضل أداء ميكانيكي وفيزيائي، مع مراعاة الجوانب البيئية والاقتصادية. وبذلك، توفر الدراسة بيانات علمية دقيقة تسهم في تطوير المواد الرابطة المستدامة ودعم توجهات البناء الصديق للبيئة، بما يواكب الجهود الدولية لتحقيق التنمية المستدامة.

المشكلة البحثية

رغم الدراسات المتزايدة حول الجيوبوليمرات كمادة إنشائية بديلة، إلا أن تأثير إضافة مركبات قلوية مثل هيدروكسيد الكالسيوم على خصائصها الفيزيائية والميكانيكية ما زال غير واضح بشكل كافٍ، خاصة عند استخدام البوزولان الطبيعي كمصدر للسيلكا والالومنيا ومن هنا تنبع ضرورة دراسة كيفية تأثير محتوى هيدروكسيد الكالسيوم على أداء هذه الخلطات.

فرضيات الدراسة

- تؤثر الزيادة في محتوى هيدروكسيد الكالسيوم على البنية المجهرية للجيوبوليمر، مما ينعكس على خصائصه الميكانيكية والفيزيائية.
- توجد نسبة مثلى من هيدروكسيد الكالسيوم تحقق توازنًا بين القوة والمتانة والكلفة الاقتصادية.

منطقة الدراسة

لقد تم إجراء الاختبارات لهذه الدراسة على عينات من المواد البوزلانية التي تم اخدها من منطقة سبها بالجنوب الليبي.

يقع الموقع على بعد حوالي 10 كم شمال شرقي مدينة سبها على بعد 100 م يمين الطريق الواصل الى منطقة وادي البوانيس.

المواد وطرق البحث

- الميتاكآولين : تم تحضير العينة وفق الخطوات التالية

1. اجراء عملية الكلسنة للكآولين (البوزولان الطبيعي) وهي عملية الحرق بواسطة الفرن بدرجة حرارة 800 درجة مئوية ولزمن ساعتان.
2. الطحن باستخدام جهاز لوس انجلوس ثم استخدام آلة طحن خاصة لتنعيمها أكثر.
3. نخل العينة وتمريرها من منخل رقم 170 (90 ميكرو متر).

الجدول 1: تحليل العناصر الداخلة في تركيب عينة الميتاكآولين باستخدام جهاز حيود الاشعة السينية (XRD)

ر.ت	اسم المركب الكيميائي	الرمز الكيميائي	النسبة الوزنية (%)
1	ثنائي أكسيد السيليكون	Sio_2	58.3
2	أكسيد الالومنيوم	Al_2O_3	29.4
3	أكسيد الحديد الثلاثي	Fe_2O_3	2.87
4	أكسيد الكالسيوم	CaO	1.08
5	أكسيد الماغنسيوم	MgO	0.0001>
6	الكلور	CL	0.375
7	أكسيد الصوديوم	Na_2O	-
8	أكسيد البوتاسيوم	K_2O	0.533
9	ثنائي أكسيد التيتانيوم	TiO_2	5.2
10	ثالث أكسيد الكبريت	SO_3	0.971

من الجدول (1) أظهرت نتائج التحليل الكيميائي لعينة الميتاكاولين أن نسبة ثنائي أكسيد السيليكون (SiO_2) بلغت 58.3%، وهي تقع ضمن الحدود الموصى بها وفقًا للمواصفة الأوروبية EN 197-1:2023 التي تحدد أن نسبة

SiO_2 في المواد البوزولانية يجب أن تكون أعلى من 25%، كما تشترط أن يكون مجموع ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) أكبر من 70%، وهو ما تحقق في هذه العينة إذ بلغ مجموعها 90.57%، مما يؤكد صلاحيته كمواد بوزولانية فعالة في تصنيع الجيوبوليمر [18].

الشكل 1: العمليات المتبعة لتحضير عينة الميتاكاولين

يوضح الشكل (1) المراحل المختلفة لتحضير المواد الأولية المستخدمة في هذه الدراسة. تبدأ العملية بتجهيز عينة الكاولين واجراء عملية الحرق ، حيث يتم الحرق لمدة ساعتان لضمان اتمام عملية الكلسنة للعينة. بعد ذلك، تطحن العينة باستخدام جهاز لوس انجلوس وتمرر من منخل 170 للحصول على مسحوق ناعم متجانس الجزيئات.

هذه المراحل تضمن الحصول على مادة أولية متجانسة من حيث الحجم والتركيب، مما يعزز من دقة النتائج التجريبية ويقلل من التباين المحتمل في الخواص الفيزيائية أو الكيميائية للعينة.

هيدروكسيد الكالسيوم

هو مركب كيميائي غير عضوي صيغته الكيميائية هي Ca(OH)يطلق عليه في العادة اسم الجير المطفأ، ويتم تحضيره عن طريق إضافة الماء إلى أكسيد الكالسيوم (الجير الحي).

أظهرت النتائج (الجدول 2) أن النسبة الوزنية لأكسيد الكالسيوم (CaO) بلغت 94%، وهو ضمن الحد الموصى به في المواصفة ASTM C25–2023، والتي تنص على أن نقاوة CaO في الجير المطفأ المستخدم في الأغراض الصناعية يجب أن تكون أكبر من 85%. كما أن نسب الشوائب الأخرى مثل Fe_2O_3 وSiO_2 وAl_2O_3 كانت منخفضة، مما يشير إلى جودة عالية ونقاوة مناسبة للاستخدام في التفاعلات القلوية للجيوبوليمر [19].

ماء الخلط

تخلط جميع المكونات بماء معد للخلط، والجدول (3) يبين التركيز الوزني لكل عنصر من مكونات الماء.

الجدول 2: تحليل العناصر الداخلة في تركيب عينة هيدروكسيد الكالسيوم باستخدام جهاز حيود الاشعة السينية (XRD)

ر.ت	اسم المركب الكيميائي	الرمز الكيميائي	النسبة الوزنية (%)
1	أكسيد الكالسيوم	CaO	94
2	ثنائي أكسيد التيتانيوم	TeO2	2.93
3	ثنائي أكسيد السيليكون	SiO2	0.958
4	أكسيد الالومنيوم	Al2O3	0.741
5	أكسيد الحديد الثلاثي	Fe2O3	0.389
6	الكلور	CL	0.287
7	ثالث أكسيد الكبريت	SO3	0.181
8	أكسيد النيكل	NiO	0.131
9	أكسيد الكروم الثلاثي	Cr2O3	0.101
10	أكسيد السترونشيوم	SrO	0.0991

الجدول 3: التحليل الكيميائي لعناصر الماء المعد للخلط

ر.ت	اسم المركب الكيميائي	الرمز الكيميائي	التركيز (Mg/L)
1	الاملاح الذائبة	T.D.S	120
2	الكلوريدات	CL	21.4
3	الكبريتات	SO_4	12.9
4	مجموع الكربونات والبيكربونات	CO_3+ HCO_3	32.3
5	ايون الهيدروجين	PH	7

يبين الجدول (3) إن جميع القيم التي تم قياسها تقع ضمن الحدود المسموح بها وفقًا للمواصفة ASTM C1602/C1602M–2023 الخاصة بمياه الخلط للخرسانة. حيث أن تركيز الكلوريدات (21.4 mg/L)، والكبريتات (12.9 mg/L)، والأملاح الذائبة الكلية (120 mg/L)، جميعها أقل بكثير من الحدود العليا المحددة وهي على التوالي: 500 mg/L، 1000 mg/L، و2000 mg/L. وهذا يؤكد صلاحية الماء المستخدم في خلط المواد الجيوبوليمرية [20].

تصميم الخلطات ومنهجية إعداد العينات

في هذه الدراسة تم التركيز على دراسة فاعلية هيدروكسيد الكالسيوم ($Ca(OH)_2$) كمنشط قلوي، باستخدام الميتاكاولين كمصدر بوزولاني طبيعي، تهدف الدراسة إلى تحديد النسبة الفعالة من هيدروكسيد الكالسيوم التي تساهم في تحسين الخصائص للخلطات الجيوبوليمرية، وذلك من خلال إعداد سلسلة من الخلطات بنسب متدرجة من هيدروكسيد الكالسيوم من وزن المادة البوزولانية.

تم استخدام الميتاكاولين الناتج عن معالجة الكاولين حرارياً عند درجة حرارة 800 °م، كمصدر للسيليكا والألومينا التفاعلية وتمت إضافة هيدروكسيد الكالسيوم بنسب وزنية متدرجة إلى الخلطة، ابتداءً من 10% ثم زيادته تدريجياً إلى 20%، 30%، حتى 80%، بهدف دراسة فاعليته على مقاومة الضغط والخصائص الفيزيائية.

تم صب العينات في قوالب مكعبية بأبعاد قياسية (50 × 50 × 50 ملم)، باستخدام اهتزاز ميكانيكي خفيف لضمان توزيع متجانس للمادة داخل القالب ومنع احتباس الهواء. بعد الصب، تُركت العينات لمدة 24 ساعة في درجة حرارة الغرفة مغطاة بغطاء بلاستيكي للحفاظ على الرطوبة ومنع التبخر السريع، ثم أُزيلت من القوالب وتمت معالجتها في درجة حرارة المختبر (حوالي 25 ± 2 °م) إلى حين موعد الاختبار، تمت جدولة الاختبارات على

عمرين مختلفين:

- 7 أيام لتقييم المقاومة المبكرة.
- 28 يومًا لتقييم المقاومة المتأخرة وتعيين درجة الامتصاص، الكثافة الظاهرية، نسبة الفراغات.

الجدول 4: الخلطات ونسب المواد المستخدمة في الخلطات

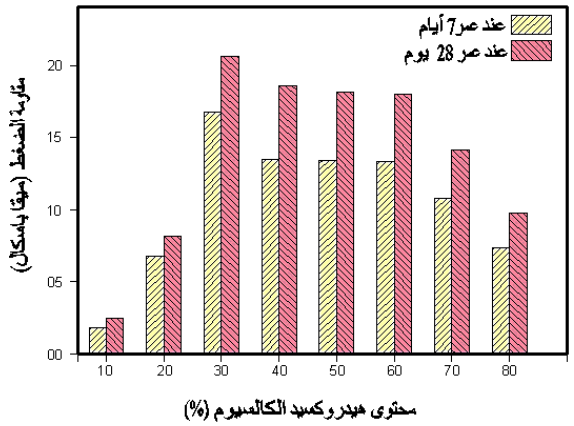
ر.ت	رمز العينة	نسبة الميتاكاولين (%)	نسبة هيدروكسيد الكالسيوم (%)	المحتوى المائي الى الوزن الجاف (%)
1	90P-10CH	90%	10%	0.40%
2	80P-20CH	80%	20%	0.40%
3	70P-30CH	70%	30%	0.40%
4	60P-40CH	60%	40%	0.40%
5	50P-50CH	50%	50%	0.40%
6	40P-60CH	40%	60%	0.40%
7	30P-70CH	30%	70%	0.40%
8	20P-80CH	20%	80%	0.40%

يوضح الجدول (4) الخلطات الجيوبوليمرية المختلفة التي تم إعدادها خلال هذه الدراسة، حيث تم تغيير نسب الميتاكاولين (P) وهيدروكسيد الكالسيوم (CH) مع تثبيت المحتوى المائي إلى الوزن الجاف عند 0.40% لجميع الخلطات. يتضح من الجدول أنه تم تحضير ثمانية خلطات تجريبية تبدأ بنسبة ميتاكاولين عالية (90%) وتنخفض تدريجيًا حتى تصل إلى 20%، في حين ترتفع نسبة هيدروكسيد الكالسيوم من 10% لتصل إلى 80% في الخلطة الأخيرة. الهدف من هذا التدرج هو دراسة تأثير هيدروكسيد الكالسيوم على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للخلطات الجيوبوليمرية الناتجة. كما أن تثبيت نسبة الماء إلى الوزن الجاف يسمح بعزل تأثير المتغيرات الأخرى والتركيز فقط على تأثير نسب المواد الصلبة.

النتائج والمناقشة

1. مقاومة الضغط

فيما يلي مخطط يوضح العلاقة بين محتوى هيدروكسيد الكالسيوم ومقاومة الضغط عند عمر 7 و28 يوماً. تم إجراء اختبار مقاومة الضغط وفقًا للمواصفة القياسية ASTM C109/C109M-23 [21].



الشكل 2: محتوى هيدروكسيد الكالسيوم ومقاومة الضغط عند 7 و28 يوما

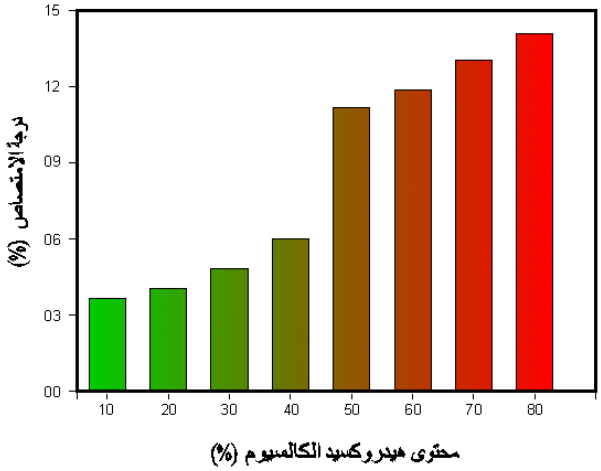
من الشكل (2) أظهرت نتائج اختبار مقاومة الضغط عند عمر 7 و28 يوماً سلوكاً غير خطي مع تغير نسبة هيدروكسيد الكالسيوم في الخليط. حيث لوحظ ارتفاع تدريجي في المقاومة مع زيادة محتوى $Ca(OH)_2$ حتى نسبة 30%، تليها مرحلة انخفاض تدريجي مع زيادة النسبة لما بعد هذا الحد. سجلت العينة التى تحتوي على 30% من هيدروكسيد الكالسيوم أعلى مقاومة ضغط حيث بلغت:

- 16.76 ميغا باسكال عند 7 أيام
- 20.65 ميغا باسكال عند 28 يوماً

وتُعزى هذه النتائج إلى أن النسبة المثلى من هيدروكسيد الكالسيوم تُوفر بيئة قلوية كافية لتنشيط الميتاكاولين وتكوين مركبات الجيوبوليمر والتي تلعب دوراً مهماً في تحسين التماسك البنيوي للجيوبوليمير. وهذا يتوافق مع نتائج Zhang et al. (2023)[13] و[14] Ali et al. (2024) ، حيث تم رصد تحسن ملحوظ في مقاومة الضغط عند زيادة تركيز $Ca(OH)_2$ حتى حد معين، وبعده تبدأ التأثيرات السلبية بالظهور نتيجة التشبع القلوي وعدم تفاعل الفائض.

2. تعيين درجة الامتصاص

يُظهر الشكل التالي العلاقة بين نسبة هيدروكسيد الكالسيوم ودرجة الامتصاص، والتي تم تحديدها باستخدام المواصفة القياسية ASTM C642-23 [22].



الشكل 3: محتوى هيدروكسيد الكالسيوم ودرجة الامتصاص لخلطات الجيوبوليمير

من الشكل (3) تُظهر النتائج أن درجة الامتصاص ازدادت مع ارتفاع نسبة هيدروكسيد الكالسيوم في الخلطات، حيث بلغت:

- 3.66% في العينة التى تحتوي على 10% من هيدروكسيد الكالسيوم
- 14.08% في العينة التى تحتوي على 80% من هيدروكسيد الكالسيوم

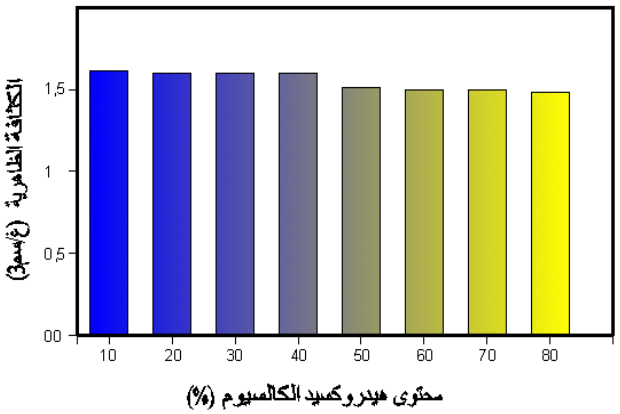
هذا الارتفاع في الامتصاص يرتبط بشكل مباشر بزيادة المسامية الناتجة عن ضعف تفاعل $Ca(OH)_2$ مع الميتاكاولين في النسب العالية، مما يؤدي إلى بنية غير كثيفة تحتوي على فراغات دقيقة تسمح بامتصاص الماء وقد أيدت نتائج Wang et al. (2025) [10] و Nguyen et al. (2023) [12]. هذه الملاحظة، مؤكدين أن ارتفاع المسامية مرتبط مباشرة بضعف التفاعل الكيميائي.

من الناحية الهندسية، تعتبر خاصية الامتصاص مؤشراً على جودة البنية المجهرية للجيوبوليمير، حيث أن الخلطات ذات الامتصاص المنخفض تميل إلى امتلاك كثافة أعلى وتماسك أفضل، مما ينعكس إيجابيًا على مقاومة

الضغط والمتانة.

3. تعيين الكثافة الظاهرية

فيما يلي العلاقة بين محتوى هيدروكسيد الكالسيوم والكثافة الظاهرية، التي تم تعيينها وفقًا للمواصفة ASTM C138/C138M-24 [23].



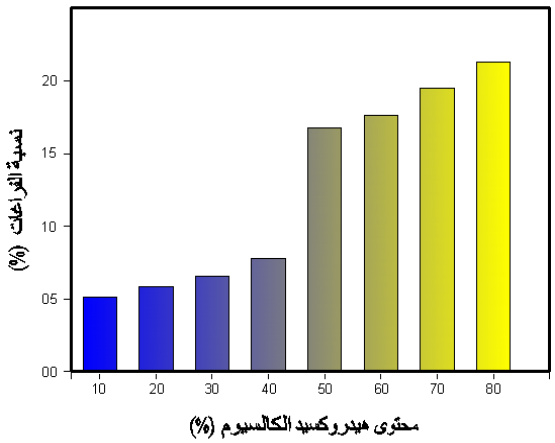
الشكل 4: محتوى هيدروكسيد الكالسيوم والكثافة الظاهرية لخلطات الجيوبوليمير

من الشكل (4) تُشير نتائج الكثافة الظاهرية إلى وجود تناقص تدريجي مع ارتفاع نسبة هيدروكسيد الكالسيوم، حيث انخفضت الكثافة من 1.613غ/سم³ في العينة تحتوي على 10% من هيدروكسيد الكالسيوم إلى 1.485 غ/سم³ في العينة تحتوي على 80% من هيدروكسيد الكالسيوم.

ويمكن تفسير هذا التناقص بازدياد المسامية وتقليل كثافة الشبكة الجيوبوليمرية، لاسيما في الخلطات التي تحتوي على نسبة منخفضة من الميتاكاولين، يتماشى هذا مع ما توصلت إليه دراسة Elhassan & Abobakr (2024) [15] ، والتي أشارت إلى أن تناقص الكثافة يعكس زيادة المسامية الناتجة عن خلل في تكوين الشبكة الجيوبوليمرية. فالميتاكاولين يُعد المصدر الأساسي للسيليكا والألومينا التي تدخل في تشكيل البنية ثلاثية الأبعاد للجيوبوليمر وعند انخفاض نسبته، تتشكل شبكة غير مكتملة، مما يؤدي إلى انخفاض الكثافة وارتفاع الامتصاص.

4. تعيين نسبة الفراغات

فيما يلي العلاقة بين محتوى هيدروكسيد الكالسيوم ونسبة الفراغات، التي تم تعيينها وفقًا للمواصفة ASTM C457/C457M-23 [24].



الشكل 5: محتوى هيدروكسيد الكالسيوم ونسبة الفراغات لخلطات الجيوبوليمير

من الشكل (5) أظهرت نتائج الدراسة أن نسبة الفراغات في الخلطات الجيوبوليمرية تزداد بزيادة محتوى هيدروكسيد الكالسيوم، حيث بلغت أدنى قيمة للفراغات (5.132 %) في العينة التى تحتوي على 10% من هيدروكسيد الكالسيوم، في حين ارتفعت بشكل ملحوظ عند النسب الأعلى.

يعود ذلك إلى محدودية التفاعل البوزولاني عند زيادة القلوية بشكل مفرط، مما يؤدي إلى تراكم هيدروكسيد الكالسيوم غير المتفاعل وتشكّل بلورات تسهم في زيادة المسامية، وهو مايشير الى التأثير السلبي للقلوية الزائدة على البنية الجيوبوليمرية. وعليه، يمكن استنتاج أن النسبة المثلى لهيدروكسيد الكالسيوم يجب ألا تتجاوز 30% من المواد البوزولانية لتحقيق أقل نسبة فراغات وأفضل أداء ميكانيكي واقتصادي. وهذا يتماشى مع دراسة Ali et al. (2024) [14]. التي بينت أن الزيادة من هيدروكسيد الكالسيوم يقلل فعالية التفاعل البوزولاني.

الاستنتاجات

1. النسبة الفعالة لهيدروكسيد الكالسيوم في الخلطات الجيوبوليمرية المحتوية على الميتاكاولين هي التى تمثل 30% من وزن المواد البوزولانية.
2. النسبة المثالية هي التي تحقق توازنًا بين التفاعل القلوي وتوفر المواد الفعالة، مما يؤدي إلى تكوين بنية كثيفة ذات مقاومة عالية ومنخفضة الامتصاص والفراغات.
3. تجاوز النسبة الفعالة يؤدي إلى نتائج عكسية بسبب ترسيب مواد غير متفاعلة وزيادة المسامية.

التوصيات

1. اعتماد نسبة 30% من هيدروكسيد الكالسيوم كمحتوى أمثل في الخلطات الجيوبوليمرية القائمة على الميتاكاولين المحلي، حيث أظهرت هذه النسبة أعلى مقاومة ضغط وأدنى نسبة فراغات، مما يشير إلى تحقيق توازنا بين التفاعل البوزولاني والكثافة البنيوية.
2. اعتماد الخواص الفيزيائية مثل الامتصاص، الكثافة الظاهرية، ونسبة الفراغات كمؤشرات تقييم معيارية عند تصميم الخلطات الجيوبوليمرية، نظراً لارتباطها المباشر بمقاومة الضغط وجودة البنية المجهرية، كما أظهرت نتائج الدراسة.
3. التوصية بإجراء تحاليل مجهرية بواسطة SEM لفحص آلية تشكل المركبات الناتجة عن تفاعل هيدروكسيد الكالسيوم مع الميتاكاولين، وخاصة عند النسب الحرجة (فوق 30%) لفهم أسباب التدهور في الأداء الميكانيكي والبنيوي.
4. تطبيق الخلطات المثلى في بيئات واقعية مثل الطوب أو الخرسانة مسبقة الصب، وذلك لاختبار أدائها تحت ظروف مختلفة مثل الرطوبة العالية أو التغيرات الحرارية، استناداً إلى النتائج السابقة
5. تشجيع استخدام الميتاكاولين المحلي كمصدر بوزولاني فعال، خصوصاً أنه أظهر تفاعلاً جيداً مع هيدروكسيد الكالسيوم بنسبة 30%، ما يدعم التوجّه نحو إنتاج مواد بناء مستدامة محليًا وفعّالة من حيث التكلفة.

Author Contributions: "All authors have made a substantial, direct, and intellectual contribution to the work and approved it for publication."
Funding: "This research received no external funding."
Conflicts of Interest: "The authors declare that they have no conflict of interest."

References

[1] G. Habert, et al., "Environmental impact of Portland cement production," *Cement and Concrete Research*, vol. 187, p. 107979, 2022. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.107979

[2] E. Alajwad and A. Akasha, "Resistance of Geopolymer Mortar to Sulphates Attack (Using Local Pozzolana in Southern Libya)", *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 2, no. 1, pp. 90–94, Mar. 2025,

[3] E. Gartner and D. Sui Tongbo, "Alternative cement clinkers," *Cement and Concrete Research*, vol. 114, pp. 27–39, 2022. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.002

[4] J. L. Provis, "Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?," *Materials and Structures*, vol. 55, no. 1, pp. 1–16, 2022 https://doi.org/10.1617/s11527-021-01827-5

[5] S. A. Bernal and J. L. Provis, "Durability of alkali-activated materials: progress and perspectives," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 106, no. 2, pp. 407–427, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1111/jace.18654

[6] M. Zhang, X. Guo, and Q. Liu, "Effect of calcium hydroxide on the performance of fly ash-based geopolymers," *Construction and Building Materials*, vol. 343, p. 128061, 2023. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128061

[7] D. Ali, H. A. Taha, and S. H. Al-Azzawi, "Optimization of calcium hydroxide content in geopolymer concrete," *Journal of Building Engineering*, vol. 80, p. 107350, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.107350

[8] 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.

[9] 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*, vol. 3, no. 1, pp. 24–29. 2025.

[10] L. Wang, et al., "Microstructure and mechanical properties of metakaolin-based geopolymers with various activators," *Ceramics International*, vol. 51, pp. 4982–4990, 2025. https://doi.org/10.1016/ j.ceramint.2025.01.032

[11] A. R. Khaleel and M. F. Hasan, "Utilization of local metakaolin for geopolymer production: A sustainable approach," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 22, e02003, 2025. https://doi.org/ 10.1016/j.cscm.2024.e02003

[12] B. T. Nguyen, et al., "Performance of geopolymer mixtures with calcium-based activators," *Journal of Cleaner Production*, vol. 406, p. 137004, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137004

[13] M. Zhang, Y. Wu, and S. Chen, "Calcium hydroxide-assisted geopolymerization: insights into strength development," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 295, p. 127190, 2023https://doi.org/ 10.1016/j.matchemphys.2022.127190

[14] D. Ali, A. Hassan, and M. Saleh, "Effect of varying calcium hydroxide content on geopolymer concrete properties," *Construction and Building Materials*, vol. 368, p. 130413, 2024. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.130413

[15] L. Elhassan and K. Abobakr, "Metakaolin-based geopolymers using Libyan raw materials," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 50, pp. 3417–3430, 2024. https://doi.org/10.1007/ s13369-023-08263-9

[16] M. Al-Sharif, et al., "Evaluating locally sourced metakaolin for sustainable geopolymer binders," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 35, e00501, 2024. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024. e00501

[17] S. Elghazali and H. Bashir, "Characterization of Libyan metakaolin for geopolymer use," *Materials Today: Proceedings*, vol. 83, pp. 1231–1237, 2025. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024. 12.056

[18] European Committee for Standardization, *EN 197-1:2023 - Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*, Brussels, Belgium, 2023. https://doi.org/ 10.3403/30531356

[19] ASTM International, *ASTM C25-2023 - Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime*, West Conshohocken, PA, USA, 2023. https://doi.org/ 10.1520/C0025-23

[20] ASTM International, *ASTM C1602/C1602M-23 - Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete*, West Conshohocken, PA, USA, 2023. https://doi.org/ 10.1520/C1602_C1602M-23

[21] ASTM C109/C109M-23, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023. https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-23

[22] ASTM C642-23, *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*, ASTM International, 2023. https://doi.org/10.1520/ C0642-23

[23] ASTM C138/C138M-24, *Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete*, ASTM International, 2024. https://doi.org/10.1520/C0138_C0138M-24

[24] ASTM C457/C457M-23, *Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*, ASTM International, 2023. https://doi.org/10.1520/C0457_C0457M-23