Wadi AlShatti University Journal of Pure and Applied Science

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

CIVIL ENGINEER

The Effect of Burning Time of Pozzolana Southern Libya on the Properties of Concrete

Fouad Farag Farouj [1], Ebtehal Abdurahman Al-zwai [1,*]

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

ARTICLE HISTORY

Received 13 November 2024
Revised 10 December 2024
Accepted 03 January 2025
Online 05 January 2025

KEYWORDS

Kaolin;
Metakaolin;
Thermal activation X-ray;
Fluorescence(XRF).

ABSTRACT

Metakaolin is a pozzolanic material produced by thermal activation of kaolin. This research aims to study the effect of temperature and firing time on the pozzolanic properties and reactivity of the resulting material. Two types of raw materials, which are abundantly available in southern Libya, were used: Sebha pozzolan and Tamanhint pozzolan, which were thermally activated inside the oven at temperatures ranging from 500-800 °C for half an hour, an hour, an hour and a half, and two hours. Compressive strength tests were also conducted on concrete mixtures containing metakaolin to study the reactivity of the produced materials. The results showed that the Sebha sample achieved a 10.89% higher compressive strength compared to the Tamanhint sample. It was also shown that thermal activation of kaolin actually starts at one hour, leading to its transformation into effective metakaolin. It was also found that the optimum temperature for thermal activation is 600 °C, as the changes in the chemical composition of these materials were documented using an X-ray fluorescence (XRF) device. Moreover, it was observed that thermally activated metakaolin has a positive and significant effect on improving the compressive strength of concrete mixes.

تأثيرزمن حرق بوزلان الجنوب الليبي على خواص الخرسانة

فؤاد فرج فروج[1]، ابتهال عبد الرحمن الزوي[1]*

الملخص

"الميتاكاؤلين" هو مادة بوزولانية يتم إنتاجها من خلال التنشيط الحراري للكاؤلين. يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير درجة الحرارة ومدة الحرق على الخواص البوزولانية وتفاعلية المادة الناتجة. تم استخدام نوعين من المواد الخام المتوفرة بكثرة في الجنوب الليبي، وهما: بوزلان سبها وبزولان تمنهنت، حيث تم تنشيطها حراريًا داخل الفرن عند درجات حرارة تتراوح بين 500-800 درجة مئوية لمدة نصف ساعة، ساعة، ساعة ونصف، وساعتين. كما تم إجراء اختبار قوة الضغط على الخلطات الخرسانية المحتوية على الميتاكاؤلين لدراسة تفاعلية المواد المنتجة. أظهرت النتائج أن عينة سبها حققت قوة ضغط أعلى بنسبة 10.89% مقارنةً بعينة تمنهنت. كما تبين أن التنشيط الحراري للكاؤلين يبدأ فعليًا عند زمن ساعة، مما يؤدي إلى تحوله إلى ميتاكاؤلين فعال. وُجد أيضًا أن درجة الحرارة المثالية للتنشيط الحراري هي 600 درجة مئوية، حيث تم توثيق التغيرات في التركيب الكيميائي لهذه المواد باستخدام جهاز الأشعة السينية (XRF). علاوة على ذلك، لوحظ أن الميتاكاؤلين المنشط حراريًا له تأثير إيجابي وملموس على تحسين قوة الضغط للخلطات الخرسانية.

الكلمات المفتاحية

الكاؤلين
الميتاكاؤلين
التنشيط الحراري
قوة الضغط
جهاز الأشعة السينية

المقدمة

اهتم قسم الهندسة المدنية بجامعة وادي الشاطئ بإيجاد بديل اقتصادي وصديق للبيئة للإسمنت التقليدي بسبب الارتفاع الكبير في تكلفة الطاقة المستهلكة والانبعاثات البيئية، مثل ثاني أكسيد الكربون، الناتجة عن صناعة إنتاج الإسمنت، ظهرت محاولات عديدة لتقليل إنتاج الإسمنت والبحث عن مواد بديلة صديقة للبيئة .

علاوة على ذلك، فإن الاستخدام الواسع للهياكل الخرسانية والحاجة إلى أنواع مختلفة من الخرسانة يُضفي أهمية إضافية على هذه الجهود.

الميتاكاؤلين هو إحدى هذه المواد، ويُصنف ضمن الجيل الجديد من المواد الإسمنتية التكميلية .(SCMs) يُعد الميتاكاؤلين مادة صلبة دقيقة الطحن تُستخدم كبديل جزئي للكلنكر في إنتاج الإسمنت أو في الخلطات الخرسانية. يحقق استخدام الميتاكاؤلين في الأنظمة الإسمنتية فوائد بيئية وفنية كبيرة.

الميتاكاؤلين يُنتج من خلال التنشيط الحراري لمادة الكاؤلين، وقد حظي باهتمام كبير في السنوات الأخيرة باعتباره مادة بوزولانية فعالة. يعود أول استخدام للميتاكاؤلين في الخرسانة إلى سدجوبيا بالبرازيل عام 1962. وعلى الرغم من أن الاعتماد عليه في صناعة الخرسانة يُعتبر حديثًا نسبيًا – حيث لا يتجاوز عمره نحو 20 عامًا – إلا أن استخدامه أصبح شائعًا منذ إدخال الميتاكاؤلين التجاري إلى السوق في عام 1994 [1].

تتميز جزيئات الكاؤلين بصغر حجمها وشكلها المسطح الشبيه بالصفائح، كما أنها تتميز بنعومتها وملمسها الصابوني، إضافة إلى سهولة انقسامها وانخفاض

*Corresponding author: e.alzwi@wau.edu.ly
https://doi.org/

التآكل [1] .

في هذه الدراسة، تم استخدام الكاؤلين المتوفر محليًا بوفرة في جنوب ليبيا، حيث تم أخذ عينتين من منطقتي تمنهنت وسبها. تُظهر الشكل 1-2 الموقع الجغرافي لمصادر الكاؤلين باستخدام صور الأقمار الصناعية [7].

الشكل 1: موقع الكاؤلين في منطقة تمنهنت

الشكل 2: موقع الكاؤلين في منطقة سبها

التحول الحراري للكاؤلين: مراحل إزالة الهيدروكسيد وتكوين الميتاكاؤلين

يتم تحضير الميتاكاؤلين من خلال حرق الكاؤلين، حيث تمر عملية تحوله إلى ميتاكاؤلين بثلاث مراحل تتضمن إزالة الهيدروكسيد من طين الكاؤلين عند نطاق حراري يتراوح بين 500-[10]800 درجة مئوية. يؤدي هذا النطاق الحراري إلى فقدان الماء الكيميائي وتفكك التركيب البلوري[2]، مما يحوّل الطور إلى مادة غير متبلورة ذات تفاعل عالٍ تُعرف باسم الميتاكاؤلين ($Al_2O_3.2SiO_2$).

تتم عملية إزالة الهيدروكسيد عبر ثلاث خطوات رئيسية:

1. الخطوة الأولى: يتم تسخين الكاؤلين إلى أقل من 200 درجة مئوية لإزالة الماء الممتص طبيعيًا ومياه الطبقة البينية نظرًا لضعف ارتباطها وحركتها.[2]

2. الخطوة الثانية: عند درجات حرارة تتراوح بين 450-500 درجة مئوية، تتم إزالة جزيئات الماء المرتبطة بقوة في مجال التنسيق الأول لأيونات الطبقة البينية.[2]

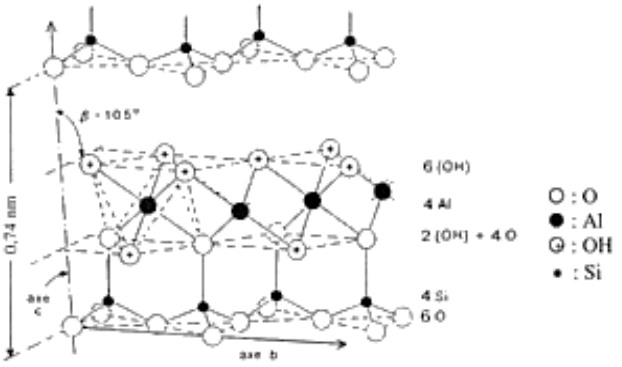
3. الخطوة الثالثة: يتم تكثيف مجموعات الهيدروكسيد الهيكلية وتجفيفها عند درجات حرارة تتراوح بين 500-800 درجة مئوية، مما يؤدي إلى فقدان مجموعة الهيدروكسيد وإعادة ترتيب طبقة ثماني السطوح إلى شكل رباعي السطوح في الطين المكلس [2] .

خلال عملية التحلل الحراري لبلورة الكاؤلينيت، يتكون الميتاكاؤلين الذي يكون مضطربًا جزئيًا، ومع ذلك، لا تنهار المرحلة الجديدة من الميتاكاؤلينيت وتحتفظ ببنية الطبقات.

يتكوّن الكاؤلين من بنية طبقية ثنائية الأوكتاهدرا بنسبة (1:1)، حيث تتألف كل طبقة من ورقتين: الأولى رباعية السطوح، تُنسّق فيها ذرات السيليكون بشكل رباعي بواسطة ذرات الأكسجين، والثانية صفيحة ثماني السطوح، تُنسّق فيها ذرات الألومنيوم مع مجموعات الهيدروكسيد والأكسجين القمي المشترك مع ورقة السيليكا الرباعية [2].

بالتالي، يكون أحد جانبي كل طبقة ذا سطح سيلوكسان ناتج عن قواعد السيليكا الرباعية، بينما يحتوي الجانب الآخر على مجموعات الهيدروكسيد الخاصة بثماني وجوه الألومنيوم. تساهم الرابطة الهيدروجينية بين هذين السطحين في توفير طاقة تماسك كبيرة تجعل تشذير الكاؤلين صعبًا. ونظرًا لتعادل طبقة الكاؤلينيت، فإن الروابط الهيدروجينية (Al-OH-O-Si) تُشكّل ارتباطًا قويًا بين الطبقات المتجاورة [3].

على الرغم من أن صفائح رباعي السطوح تحتوي على أسطح أكسيد، إلا أن الطبقات ثماني السطوح تُظهر بيئة غير متماثلة تحتوي على مجموعات الهيدروكسيد في السطح المتوسط، مما يُضعف قوى "فان دير فالس" على امتداد المحور c. توجد مجموعات OH الخاصة بالسطح الداخلي عموديًا على صفيحة رباعية السطوح للطبقة التالية، مما يُمهّد لإنشاء روابط هيدروجينية قوية. وبسبب هذه الخصائص، يُصنّف الكاؤلينيت كمعدن غير قابل للتمدد، والشكل 3 يوضح التركيب بلوري للكاؤلين.



الشكل 3: تبين تركيب بلورة الكاؤلين

وفقًا لبعض الدراسات، فإن أفضل درجة حرارة لتنشيط الكاؤلين وإنتاج الميتاكاؤلين تبدأ من 650 درجة مئوية[4] . عند هذه الدرجة، يحدث فقدان كبير لمجموعات الهيدروكسيد، وتصبح البنية البلورية غير مستقرة، حيث تتعرض الروابط التساهمية لتكسير عشوائي نتيجة ضعف بعضها مقارنة بالآخر. يزداد هذا الاضطراب مع ارتفاع درجة الحرارة وزيادة مدة الحرق حتى تصل البنية البلورية إلى مرحلة التراص الكامل والخمول، مما يمنعها من التفاعل. لذلك، من الضروري اختبار الكاؤلين عند درجات حرارة وأزمنة مختلفة للوصول إلى أفضل الظروف التي تضمن تفاعله المثالي مع الإسمنت.

تشير بعض الأبحاث الأخرى إلى أن درجة الحرارة المثلى قد تزيد عن 700. درجة مئوية، ويفضل ألا تقل عن 750 درجة[5] ومع ذلك، عند استخدام درجات حرارة مرتفعة جدًا، قد تتشكل مادة بلورية خاملة تعرف بـ (AS2) نتيجة للتحولات الطورية. في هذه الحالة، يفقد الكاؤلين النقي جزءًا كبيرًا من وزنه بسبب فقدان أيونات الهيدروكسيد، وهو ما يمكن تفسيره من خلال التفاعلات الكيميائية المصاحبة لهذه العملية.

$$2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 2H_2O \rightarrow 2SiO_2 \cdot Al_2O_3 + 2H_2O$$

يختلف هذا السلوك بناءً على كمية الكاؤلينيت ونقاء حجر الكاؤلين ونسبة الشوائب الموجودة فيه، كما يتباين من نوع كاؤلين إلى آخر. بناءً على ذلك، سيتم في هذا البحث اختبار نوع الكاؤلين المحلي من منطقتين (تمنهت – سبها) بجنوب ليبيا لتحديد درجة الحرارة والزمن الأمثلين لتحوله إلى ميتاكاؤلين نشط.

تؤثر درجة الحرارة، معدل التسخين، والوقت بشكل كبير على عملية نزع الهيدروكسيد. وتُعد السمة الرئيسية للميتاكاؤلين المنتج للاستخدام في الأنظمة القائمة على الإسمنت هي تفاعله البوزلاني [1]. يمكن تحديد التفاعل البوزلاني باستخدام طرق مباشرة، مثل:

- قياس الوزن الحراري (TG)،
- التحليل الحراري التفاضلي (DTA)،
- جهاز الأشعة السينية (XRF)،

أو باستخدام طرق غير مباشرة، مثل:

- قياس تطور القوة مع مرور وقت التفاعل.

أهمية البحث

نظرًا للنتائج الإيجابية المتعلقة بتأثير الميتاكاؤلين على خواص الخرسانة، وكذلك توافر العديد من مصادر الكاؤلين في جنوب ليبيا، تهدف هذه الدراسة إلى دراسة الظروف المثلى للتنشيط الحراري لأنواع مختلفة من طين الكاؤلين الخام من منطقتي تمنهنت و سبها ، والتي تحتوي على نسبة تتراوح بين 25% و50% من الكاؤلينيت. كما تهدف الدراسة إلى تقييم إمكانية استخدام هذه المواد الخام المنشطة كمضافات بوزولانية للإسمنت والخرسانة، وذلك

باستخدام جهاز الأشعة السينية (XRF)، بالإضافة إلى تحديد قوة الضغط لنماذج الملاط الإسمنتي. من خلال التخلص من مرحلة الإثراء، يمكن لهذا النهج أن يساهم في تقليل نفقات إنتاج الميتاكاؤلين بشكل كبير مقارنةً بالإثراء الرطب الوسيط وعملية التجفيف اللاحقة للمواد الخام.

المواد وطرق العمل

1. الإسمنت المستخدم في هذه الدراسة هو الإسمنت البورتلاندي العادي(opc) برتبة N42.5 من النوع الأول (إسمنت الاتحاد) وتتراوح نسبة الكلنكر الفعال فوق 90% وتركيبه الكيميائي وخواصه الفيزيائية[6]. مدونة في الجدول 1.
2. الكاؤلين تم تلخيص التركيب الكيميائي لهذه المواد في الجدول 2 وتم تقدير محتوى الكاؤلينيت في هذه المواد عند الحرق من 500-800°C[9-11].
3. الرمال المستخدمة في الخلط هي رمل طبيعي نظيف ذو امتصاص مائي 1.82% وكثافته النوعية 2560 كجم/م^3 على التوالي.

بعد اخد العينات من المحاجر تم تكسير العينات يدويا وتمريرها عبر المنخل 5 ملم

الاختبارات الكيميائية و المعملية

تم إجراء العديد من الاختبارات الكيميائية والمعملية للحصول على نتائج دقيقة للبحث. بدأ العمل بالتحليل الكيميائي لعينة الكاؤلين، حيث تم استخدام نوعين من الكاؤلين المحلي من جنوب ليبيا، وهما كاؤلين سبها وكاؤلين تمنهنت. بعد ذلك إجراء الاختبارات المعملية التي شملت الطحن والحرق باستخدام الفرن الكهربائي، ومن ثم إعداد خلطات خرسانية. تضمنت الخلطات عينة مرجعية تعتمد بالكامل على الإسمنت كمعيار للمقارنة، إلى جانب خلطات أخرى احتوت على الكاؤلين بنسبة 30%. بعد ذلك، أجريت اختبارات الضغط للمكعبات على عدة مراحل زمنية شملت 7 أيام، 28 يومًا. وفيما يلي النتائج التي تم التوصل إليها من خلال هذه الاختبارات

الجدول 1 : يوضح التركيب الكيميائي والفيزيائي للإسمنت المستخدم

التركيب الكيميائي	النسبة المئوية (%)	الاختبارات المعملية	النتائج
الفاقد عند الحرق	0.3	نسبة الماء القياسية	0.3
Sio_2	20.14	الوزن النوعي	3.15
feO_3	2.99	المساحة السطحية (g/cm^{-1})	2977
Al_2O_3	5.91	زمن الشك الابتدائي (دقيقة : ساعة)	3:25
CaO	62.9	زمن الشك النهائي (دقيقة: ساعة)	5:30
MgO	1.59	ثابت الحجم (مم)	1.00
SO_3	2.13	نعومة الإسمنت (النسبة المحجوزة)	4
Na_2O	0.19	مقاومة الانحناء	2.1ن/مم^2 بعد يومان
K_2O	0.97		7 ن/مم^2 بعد 28 يوم
أكسيد الكالسيوم الحر	2.40	مقاومة الضغط	26 ن/مم^2 بعد يومان
-	-		44 ن/مم^2 بعد 28 يوم

.النتائج

فيما يلي نتائج تحليل مكونات الكاؤلين (تمنهت – سبها) باستخدام جهاز الأشعة السينية XRF، كما هو موضح في جدول 2، الذي يبين الاختلاف في مكونات الكاؤلين من المنطقتين.

1. **تحليل المكونات الأساسية:** يتضح من الجدول أن نسبة السليكا (SiO2) في كاؤلين تمنهنت أعلى مقارنة بكاؤلين سبها.

بالمقابل، نسبة الألومينا (Al2O3) في كاؤلين سبها أعلى من نظيرتها في تمنهت.

2. **الشوائب:** بالإضافة إلى المكونات الأساسية، يحتوي الكاؤلين على نسب متفاوتة من الشوائب، وهي غالبًا أكاسيد مثل:

MnO, Fe2O3, CaO, Na2O, K2O

كما توجد مواد عضوية، تُزال عند تسخين الكاؤلين إلى درجات حرارة معينة.

3. **توزيع الشوائب:**

قد تكون هذه الشوائب موزعة بشكل منتظم ضمن البنية الأصلية للكاؤلين. كما قد تظهر على شكلت جمعات داخل الشقوق الصخرية [7].

4. تم إجراء التحليل الكيميائي لعينات كاؤلين تمنهت بعد الحرق لتحديد أفضل درجة حرارة وزمن للحرق. وبعد مقارنة النتائج، تبين أن درجة الحرارة المثلى للحرق كانت 600 درجة مئوية، حيث لوحظ عند هذه الدرجة قفزة كبيرة في النتائج كما في الاشكال 4.5.6.7 من جميع النواحي التالية:

- نسبة السيليكا.

- نسبة الألومينا.
- إجمالي نسبة الأكاسيد.
- العلاقة بين نسبة السيليكا و الألومينا.

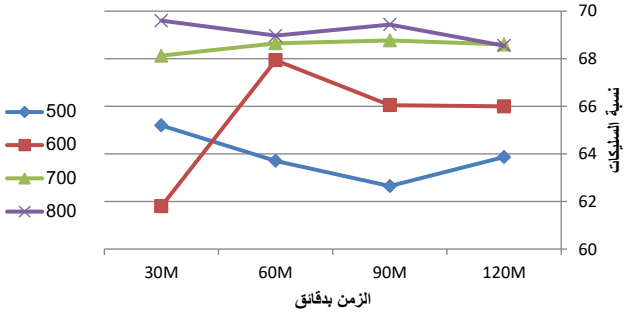
الجدول 2: يبين التحليل الكيميائي للكاؤلين (تمنهت – سبها) ومقارنته بمواصفة الأمريكية

Parameters %	قبل الحرق تمنهنت	قبل الحرق سبها	المواصفة الأمريكية ASTMC618
Sio_2	55	51.9	≥70
Al_2o_3	15.2	19.6	
Fe_2o_3	10.8	10.2	
Cao	4.05	4.98	----
Mgo	----	----	----
Cl	4.78	3.89	----
So_3	1.26	2.87	≤3
Na_2o	-----	----	≤1.5
K_2o	4.38	2.44	----
Tio_2	----	---	----
Mno	0.176	1.55	----
P_2o_5	0.848	1.25	----
V_2O_5	1.97	1.25	----
NiO	0.619	0.568	----
CuO	0.373	0.222	----
ZnO	0.215	0.194	----
Cr_2O_3	0.2	0.150	----
Co_2O_3	0.153	0.13	----
Total	%100	%100	----
$Caco_3$	-----	---	----
$Mgco_3$	-----	----	----

و قد تم تحقيق نسبة إجمالية جيدة تجاوزت 70% من القيم التي يمكن الحصول عليها عند درجات الحرارة العالية، مما يجعل هذه الدرجة اقتصادية ومثالية، حيث تحقق نتائج ممتازة عند درجة حرارة منخفضة نسبيًا.

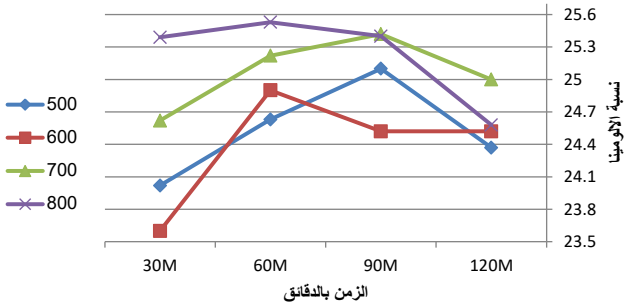
استنادًا إلى المؤشرات الأربعة المذكورة، تم التأكد من بداية تكوّن الميتاكاؤلين عند درجة حرارة 600 مئوية وزمن حرق لمدة ساعة، وهو ما ظهر بوضوح في جميع المخططات التي أظهرت الزيادة الكبيرة عند هذه الدرجة والزمن.

كل هذه النتائج موضحة بالتفصيل في المخططات التالية:

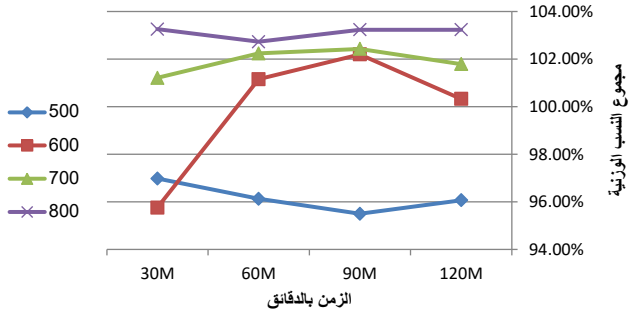


الشكل 4: يبين المقارنة بين نسبة السيلكات والزمن

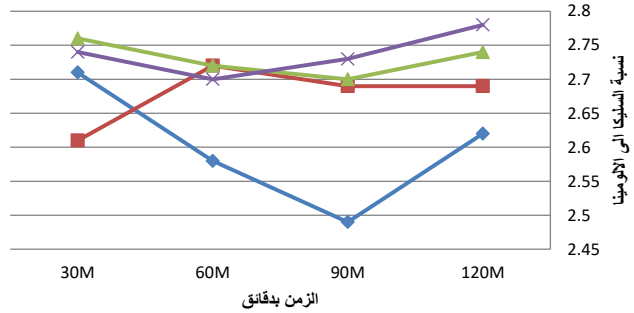
من أجل دراسة تفاعلية طين الكاؤلين المنشط، أجريت اختبارات قوة الضغط على المزيج المحتوي على 30% ميتاكاؤلين. تم تصميم المزيج باستخدام نسبة رمل إلى مادة إسمنتية (C/S) تبلغ 3.0 ونسبة وزن الماء/ نسبة 0.5. أجريت هذه الاختبارات على العينات المكعبة ذات الأبعاد 5×5×5 سم، لأعمار 7،28 يوما. تم ذكر نتائج قوة الضغط 7 ايام في



الشكل 5: يبين المقارنة بين نسبة الأولومينات والزمن



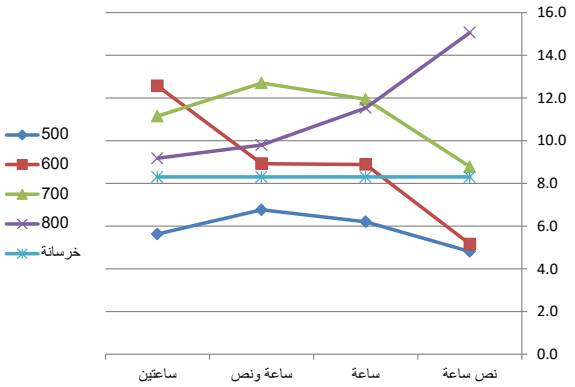
الشكل 6: يبين المقارنة بين مجموع النسب و الزمن



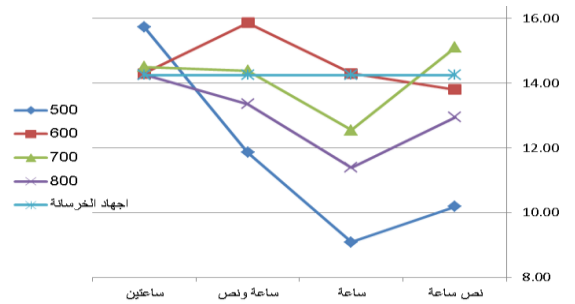
الشكل 7: يبين المقارنة بين نسبة السليكا إلى الألومينا

الشكل 8-9 وأيضا نتائج 28 يوماً في الشكل 10-11 يشير الاتجاه العام إلى أن قدرة التفاعل ونزع الهيدروكسيد للكاؤلينيت تزداد مع زيادة درجة الحرارة. تؤدي زيادة مدة التسخين إلى زيادة في إزالة الهيدروكسيد وهذا بدوره يؤدي إلى زيادة أخرى في التفاعل وقوة الضغط لعينات الملاط. استنادا إلى النتائج التي تم الحصول عليها، أقصى قوة الضغط للعينات التي تحتوي على ميتاكاؤلين سبها. الشكل 11 يوضح قوة الضغط لمدة 28 يوماً للعينات التي تحتوي على مادة منشطة. ويمكن ملاحظة أن الكاؤلين ينشط عند درجات حرارة من 600درجة°خلق تحسنا في قوة الضغط لمدة 28 يوما للعينات ، مقارنة بعينة التحكم.

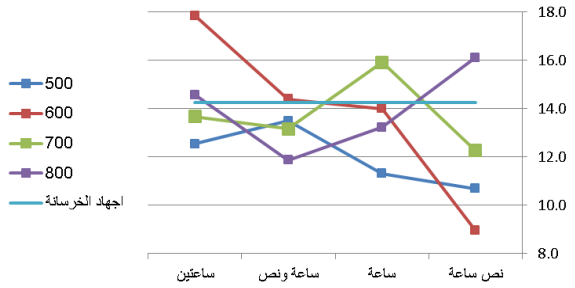
الشكل8: يوضح العلاقة بين قوة الضغط والزمن للعينة (تمنهنت)7 أيام



الشكل 9: يوضح العلاقة بين قوة الضغط والزمن للعينة (سمها) 7 أيام



الشكل 10: يوضح العلاقة بين قوة الضغط والزمن لعينة (تمهنت)28يوم



الشكل 11: يبين مقاومة الضغط لعينة (سمها) 28 يوم

مناقشة النتائج

- تم استبعاد القيم التي لم تصل إلى الفاعلية المطلوبة (إجهاد الخرسانة) ، مما سهّل تحديد القيم الأفضل لتحقيق الفاعلية البوزولانية كما في الاشكال 10-11.
- أظهرت عينات سمها أعلى قيمة لقوة الضغط، حيث بلغت 17.8 ميجا باسكال، مما يمثل زيادة بنسبة 25% عند استخدام الميتاكاؤلين المحروق عند 600 درجة مئوية لمدة ساعتين.
- بالنسبة لعينات تمهنت، بلغت قوة الضغط 15.86 ميجا باسكال عند 600 درجة مئوية بزمن ساعة ونصف.
- تفوقت نتائج عينات سمها بشكل عام من حيث الإجهاد على تمهنت، ويرجع ذلك إلى اختلاف التركيب المعدني بينهما.

تحتوي عينات سمها على نسبة أعلى من الألومينا، مما يعزز تكوين مركب (C_3A)، الذي يُساهم بشكل كبير في زيادة قوة الضغط.

الاستنتاجات

1. **خصائص الميتاكاؤلين:** يُعد الميتاكاؤلين مادة مميزة، حيث يتم إنتاجه عبر المعالجة الحرارية بدلاً من كونه ناتجاً ثانوياً لعملية صناعية أو مادة طبيعية تماماً.
2. **درجة حرارة وزمن التنشيط الحراري الأمثل:** درجة الحرارة المثلى لبداية التنشيط الحراري للكاؤلين كانت عند 600 درجة مئوية.

بالنسبة لعينات تمهنت، فإن ساعة ونصف كافية للحصول على المنتج النشط، بينما تحتاج عينات سمها إلى ساعتين، وفقا لنتائج الاختبارات.

3. **نتائج مقاومة الضغط:** عند 7 أيام: أظهرت العينات
   - عند 500 درجة مئوية مقاومة أقل من الخرسانة العادية، مما يشير إلى عدم اكتمال إزالة الهيدروكسيد وتكوين الميتاكاؤلين.
   - عند 600 درجة مئوية، ظهرت تحسينات ملحوظة في قوة الضغط بدءاً من ساعة لعينات سمها وساعة ونصف لعينات تمهنت.
   - عند درجة حرارة 700 مئوية، حققت العينات نتائج أعلى من العينة المرجعية للخرسانة.
   - أظهرت درجة 800 مئوية نتائج جيدة لعينة سمها مقارنة بالخرسانة، ونتائج أعلى لعينة تمهنت عند زمن تسخين ساعة ونصف.
4. **تحسين قوة الضغط:** يؤدي تنشيط الكاؤلين عند 600 درجة مئوية إلى تحسين واضح في قوة الضغط لمدة 28 يوماً، مقارنة بعينة التحكم (إجهاد الخرسانة).
5. **تأثير نسبة الميتاكاؤلين على الفاعلية البوزولانية:**

أظهرت نتائج اختبار قوة الضغط أن معظم العينات لم تصل إلى الفاعلية الكاملة، وهو أمر متوقع نظرًا لاستخدام نسبة كبيرة من الميتاكاؤلين (30%). الهدف من هذه النسبة العالية كان إظهار التأثير الواضح للميتاكاؤلين على قوة الضغط، على الرغم من أن الدراسات السابقة تشير إلى أن النسبة المثلى تتراوح بين (10-15%) لتحقيق توازن بين المركبات الناتجة من إماهة الإسمنت وتفاعل الميتاكاؤلين [8].

نظرًا لأن الدراسة تركز على تأثير زمن الحرق، تم استخدام نسبة 30% لاستنتاج أفضل النتائج الممكنة على الرغم من تقليل محتوى الإسمنت إلى 70%.

6. **توفير الطاقة وعلاقتها بزمن الحرق :** توفير الطاقة مرتبط بشكل مباشر بدرجة حرارة الحرق. عند إنتاج منتج فعال في درجات حرارة منخفضة، مثل 600 درجة مئوية، يتم تقليل استهلاك الطاقة بشكل كبير مقارنة بالحرق عند درجات حرارة أعلى مثل 800 درجة مئوية. هذا التخفيض في درجة الحرارة يؤدي إلى خفض كميات الوقود والطاقة المستخدمة، مما يسهم في تحقيق فوائد اقتصادية واضحة من خلال تقليل التكاليف التشغيلية وتحسين كفاءة الإنتاج.

التوصيات

1. الاهتمام اكثر بالبحث العلمي في اختبار أحجار البزولان والاستفادة منها كمواد مضافة للإسمنت تحسن من خواصه وتقلل من أضراره البيئية
2. الإنتاج الفعلي للكاؤلين المحروق الجاهز وبيعه كمواد تضاف للإسمنت بعد تحديد مواقعه وكمياته في الجنوب الليبي.
3. التفكير في إنتاج الإسمنت المخلوط الميتاكاؤلين والبدء الفعلي في الاستخدام .

Author Contributions: "Conceptualization, methodology, writing—original draft preparation, review and editing,

[5] H. Ahmed et al., "Effect of Libyan metakaolin on compressive strength of cement mortar," The 7th Libyan National Conference 2018, 2018. Available at: https://www.um.edu.mt/library/oar/bitstream/123456789/84822/1/Effect_of_Libyan_metakaolin_on_compressive_strength_of_cement_mortar_2018.pdf

[6] صابر التهامي فنير ، سفيان نزهات الزياني ، المعتصم بالله على مسعود، إبراهيم محمد قدورة "تأثير إحلال الميتاكاؤلين كبديل للإسمنت على بعض خواص الخرسانة"، المؤتمر الثاني للعلوم الهندسية والتقنية، 2 أكتوبر 2019، صبراتة، ليبيا.

[7] إبراهيم احمد المختار الحضيري، "الخامات الطبيعية بجنوب ليبيا واستخدامها كمواد للبناء"، المؤتمر الدولي للعلوم التقنية(ICST2019)، 2019، ص. 642-644.

[8] محمد أبو بكر وآخرون، "تأثير معالجة طين الكاؤلين بالحرارة على خصائص الملاط الإسمنتي الصلب والطازج".

[9] عمر إبراهيم النظيف، "تأثير طريقة حرق البوزولانا بالجنوب الليبي على المونة الإسمنتية"، رسالة ماجستير، كلية الهندسة، قسم الهندسة المدنية، جامعة وادي الشاطئ، ليبيا، 2024.

[10] عبد السلام عكاشة و إبراهيم الأجواد، ، "مقاومة ملاط الجيوبوليمر لهجوم الكبريتات باستخدام البوزولانا المحلية في جنوب ليبيا"، مجلة جامعة وادي الشاطئ للعلوم البحتة والتطبيقية، المجلد 2، العدد 1، 2024، ص. 92

[11] فؤاد فرج فروج و رضا الطاهر البوخاري، "تأثير إضافة البوزلانا الطبيعية على مواصفات المونة الإسمنتية باستخدام أنواع مختلفة من الإسمنت"، المؤتمر الدولي الثاني للعلوم الهندسية (ICES 2024)، كلية الهندسة، جامعة سرت، ليبيا، 24-25 أبريل 2024.

Farouj and Al-Zwai; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript."

Funding: "This research received no external funding."

Data Availability Statement: "The data are available at request."

Acknowledgments: The author would like to express their appreciation to Sebha University and Wadi AlShatti University. The appreciation is also extended to Brak Municipality and inhabitants for their collaboration.

Conflicts of Interest: "The authors declare no conflict of interest."

References

[1] G. Lizia Thankam and N. Thurvas Renganathan, "Ideal Supplementary Cementing Material–Metakaolin: A Review," International Review of Applied Sciences and Engineering, vol. 11, no. 1, 2020, pp. 58–65. Available at: https://akjournals.com/view/journals/1848/11/1/article-p58.xml.

[2] S. Sperinck, P. Raiteri, N. Marks, and K. Wright, "Dehydroxylation of kaolinite to metakaolin—a molecular dynamics study," Journal of Materials Chemistry, vol. 21, 2011, pp. 2118–2125. Available at: https://doi.org/10.1039/C0JM01748E.

[3] R. Deju et al., "Thermal characterization of kaolinitic clay," Rom. J. Phys., vol. 66, 2021, pp. 1-8. Available at: https://rjp.nipne.ro/2021_66_1-2/RomJPhys.66.904.pdf.

[4] B. R. Ilić, A. A. Mitrović, and L. R. Miličić, "Thermal treatment of kaolin clay to obtain metakaolin," Hemijska industrija, vol. 64, no. 4, 2010, pp. 351-356. Available at: https://doiserbia.nb.rs/Article.aspx?id=0367-598X1000014I.