

## The Effect of Natural Pozzolana on Mitigating the Carbon Footprint of the Cement Industry and an Investigation into Its Influence on Enhancing Concrete Durability in Aggressive Environments

Dalia F. Awlad<sup>1,\*</sup>  , Abdulkader Al-Joundi<sup>2</sup>  

<sup>1</sup>Department of Transportation Engineering, Al-Wataniya Private University, Hama, Syria

<sup>2</sup>Department of Transportation Engineering, Hama University, Hama, Syria

### ARTICLE HISTORY

Received 10 March 2026  
Revised 28 April 2026  
Accepted 10 May 2026  
Online 22 May 2026

### KEYWORDS

Carbon footprint;  
Nitric acid;  
Concrete corrosion;  
Pozzolan;  
Cement;  
Tensile strength;  
Compressive strength.

### ABSTRACT

This research first examined the historical use of Pozzolana materials with lime since Roman times to improve the durability of structures. It then focused on studying mixtures of Portland cement (ordinary and sulfate-resistant) with natural Pozzolan available in Syria. Concrete samples were produced with varying percentages of cement replacement by Pozzolan (0%, 10%, 20%, 30%) and were cured in different environments (water as a reference, and a concentrated nitric acid environment to simulate pollution). The samples were then tested at different ages (up to 180 days) to measure changes in weight, flexural tensile strength, and compressive strength. Natural Pozzolan also plays a significant role in reducing the carbon footprint of cement manufacturing, which is one of the main strategies for a more sustainable cement industry. The main results showed that Adding Pozzolan delays the setting time and reduces the heat of hydration of concrete, which is beneficial for mass concrete structures. In the water environment, the long-term compressive strength (180 days) of samples containing Pozzolan improved, approaching that of the reference samples. In the acidic environment, samples containing Pozzolan (especially at 20%) exhibited higher corrosion resistance and a noticeable improvement in tensile and compressive strength compared to the reference samples, which deteriorated significantly. Overall, Pozzolan enhanced the durability of concrete in aggressive environments, with a 20% replacement ratio demonstrating balanced and good performance. The study established statistical relationships that can be used to predict the behavior of Pozzolana concrete and confirms the feasibility of using these local materials to improve the durability of concrete structures.

أثر البوزولانا الطبيعية في تخفيف البصمة الكربونية الناتجة عن صناعة الإسمنت ودراسة تأثير البوزولانا في زيادة مقاومة البيتون في الأوساط المخربة

داليا فرج أولاد<sup>1,\*</sup>، عبد القادر الجندي<sup>2</sup>

المخلص	الكلمات المفتاحية
تناول البحث تاريخياً استخدام المواد البوزولانية مع الكلس منذ العصور الرومانية لتحسين ديمومة المنشآت. ثم ركز على دراسة خليط من الإسمنت البورتلاندي (العادي والمقاوم للكبريتات) مع البوزولانا الطبيعية المتوفرة في سوريا. تم إنتاج عينات خرسانية بنسب استبدال متغيرة للإسمنت بالبوزولانا (0%، 10%، 20%، 30%)، وتم حفظها في أوساط مختلفة (الماء كمرجع، ووسط حمض الأزوت المركز لمحاكاة التلوث). ثم اختبرت العينات على أعمار مختلفة (حتى 180 يوماً) لقياس تغير الوزن ومقاومة الشد على الانعطاف ومقاومة الضغط. كما أن البوزولانا الطبيعية تلعب دوراً مهماً في تخفيف البصمة الكربونية لصناعة الإسمنت، وهي إحدى الاستراتيجيات الرئيسية لصناعة إسمنت أكثر استدامة. أظهرت النتائج أن إضافة البوزولانا تؤخر زمن الشك وتقلل من حرارة تميئه الخرسانة، مما يفيد في المنشآت الكتلية. في الوسط المائي، تحسنت مقاومة الضغط على المدى الطويل (180 يوماً) للعينات المحتوية على بوزولانا لتتقارب مع العينات المرجعية. في الوسط الحمضي، أظهرت العينات المضاف إليها بوزولانا (خاصة بنسبة 20%) مقاومة أعلى للتآكل وتحسناً ملحوظاً في مقاومة الشد والضغط مقارنة بالعينات المرجعية التي تدهورت بشكل كبير. بشكل عام، عززت البوزولانا متانة الخرسانة في الأوساط العدوانية، مع إظهار نسبة استبدال 20% أداءً متوازناً وجيداً. الدراسة توصلت إلى علاقات إحصائية يمكن استخدامها للتنبؤ بسلوك الخرسانة البوزولانية وتؤكد على جدوى استخدام هذه المواد المحلية لتحسين ديمومة المنشآت الخرسانية.	البصمة الكربونية حمض الأزوت تآكل البيتون البوزولانا الإسمنت المقاومة على الشد مقاومة الضغط

\*Corresponding author

[https://doi.org/10.63318/waujpas.sp\\_FISCSDR2026\\_02](https://doi.org/10.63318/waujpas.sp_FISCSDR2026_02)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).



هذا التباين الكيميائي يؤثر مباشرة على استهلاك هيدروكسيد الكالسيوم، مما يسهم في خلق بنية خرسانية أكثر صموداً أمام الهجمات الحمضية القوية [17].

#### تنشيط المواد البوزولانية بالمعالجة الحرارية

تعتمد كفاءة البوزولانا على النعومة الفائقة (أقل من 75 ميكرومتر)، وتشير الدراسات إلى أن المعالجة الحرارية حتى حدود 1000 [18] درجة مئوية تساهم في تحسين الخصائص الميكانيكية وتقليل زمن الشك من خلال تحفيز النشاط البوزولاني. ومع ذلك، فإن تجاوز هذه العتبة الحرارية يؤدي غالباً إلى تخفيض واضح في الخصائص الفيزيائية وفقدان الميزات المكتسبة [19]. إن ضبط حرارة المعالجة يمثل عاملاً حاسماً في تعزيز مقاومة الخرسانة لحمض الأتروت مع الحفاظ على كفاءة الطاقة وخفض الانبعاثات [20].

#### مميزات الخرسانة الحاوية في تركيبها على البوزولانا الطبيعية:

تمنح الإضافات البوزولانية (سواء الطبيعية أو الصناعية كالرماد المتطاير) مزايا جوهرية للخلطة الخرسانية، أبرزها زيادة المقاومة الميكانيكية في الأعمار المتوسطة، وخفض الحرارة الناجمة عن تفاعلات الإماهة، وتعزيز الحماية ضد الأوساط الحمضية. ومن الناحية العملية، تؤدي هذه الإضافات إلى تأخير زمن بداية الشك بنحو 20 دقيقة عند استبدال 20% من الإسمنت، وهو ما يُعزى إلى قدرة حبيبات البوزولانا على بعثرة حبيبات الإسمنت الفعالة، إضافة إلى زيادة الطلب على ماء الجبل بنسبة تصل إلى 7% لتحقيق القوام النظامي [21].

وعلى صعيد استقرار الحالة الطرية، تساهم النعومة الفائقة للبوزولانا في الحد من ظاهرة نزع الماء (Bleeding) بنسب كبيرة؛ حيث تنخفض معدلات النزف السطحي نتيجة تغلغل الحبيبات الدقيقة في القنوات الشعرية للمزيج [22]. ويؤدي تقليل النزف إلى تقوية منطقة الانتقال البينية (ITZ) بين العجينة والركام، مما ينتج بنية خرسانية أكثر تراصاً وأقل مسامية، وهو عامل حاسم في رفع كفاءة الخرسانة لمقاومة التآكل الناتج عن حمض الأتروت وخفض البصمة الكربونية للمنشأة الخرسانية بشكل عام [23].

#### تأثير المواد البوزولانية على حرارة الإماهة

تساهم إضافة المواد البوزولانية الطبيعية في خفض الطاقة الحرارية المنبعثة عن تفاعلات إماهة الإسمنت البورتلاندي بشكل ملحوظ، وهو ما أثبتته الدراسات المرجعية لـ (Massazza & Costa) [24]. ويتميز هذا الانخفاض بعدم اعتماده على تناسب طردي بسيط مع نسب الاستبدال، بل يرتبط بطبيعة التفاعلات الكيميائية الثانوية التي تستهلك حرارة أقل مقارنة بإماهة الكلنكر الصرف. تكتسب هذه الخاصية أهمية استراتيجية في تنفيذ المنشآت الخرسانية ذات السماكات الكبيرة، حيث تعمل البوزولانا كعامل وقائي يحد من مخاطر التشققات الحرارية الناتجة عن تدرج درجات الحرارة بين قلب المنشأ وسطحه. وقد تجلّى التطبيق العملي لهذا المبدأ في مشروعات هندسية عالمية كبرى، مثل جسر "البوابة الذهبية" وسدود "غلين كانيون" و"ديفيس" في الولايات المتحدة [25]. إن تقليل حرارة الإماهة لا يحسن الديمومة الهيكلية فحسب، بل يعزز استدامة المنشأ عبر خفض البصمة الكربونية والطاقة الكلية المرتبطة بإنتاج وتبريد الخرسانة في المشاريع الضخمة.

تُصنّف المواد البوزولانية، سواء كانت مخلفات صناعية أو زراعية كرماد قشور الأرز وهباب السيليس، كإضافات معدنية نشطة تتفاعل كيميائياً مع هيدروكسيد الكالسيوم الناتج عن إماهة الإسمنت البورتلاندي لتشكيل سيليكات الكالسيوم المائية، مما يعزز تراص البنية المجهرية ويحد من التشققات الانكماشية [1]. وبالرغم من تأثير هذه المواد على زمن الشك، إلا أن دورها الجوهرى يكمن في تحويل هيدروكسيد الكالسيوم إلى مركبات صلبة، مما يرفع مقاومة الخرسانة في الأوساط الكيميائية العدوانية، خاصة تجاه حمض الأتروت الذي يهاجم الهيدروكسيدات القابلة للانحلال ويحولها إلى أملاح نترات ذوابة [2]. إن دمج البوزولانا الطبيعية (مثل بوزولانا جنوب ليبيا) لا يقتصر على تحسين الخواص الميكانيكية عبر التنشيط الحراري [3]، بل يشكل استراتيجية محورية لخفض البصمة الكربونية الكلية لقطاع الإسمنت تماشياً مع معايير تقييم دورة الحياة المستدامة [4-6].

#### تأثير إضافة البوزولانا الطبيعية على مواصفات الخلطة الببتونية

##### البوزولانا الطبيعية

تُعرف البوزولانا الطبيعية وفق ASTM C618 بأنها مواد سيليسية أو ألومينية لا تمتلك بذاتها أية صفة رابطة [7]، إلا أنها بوجود الرطوبة والنعومة الفائقة تتفاعل كيميائياً مع هيدروكسيد الكالسيوم لتشكيل مركبات هيدروليكية لها بعض الصفات الرابطة وبناءً على هذا التعريف، يُستثنى الرمل الكوارتزي [8] من التصنيف البوزولاني لافتقاره للنعومة المطلوبة وتطلبه معالجة هيدروحرارية لتحفيز التفاعل. تاريخياً، أثبتت هذه المواد كفاءة استثنائية في منشآت قديمة كقناة السويس [9] نظراً لديمومتها العالية. وبالرغم من تراجع استخدامها بعد ظهور الإسمنت البورتلاندي عام 1824م [10]، إلا أن التوجهات الحديثة أعادت الاعتبار لهذه الخلطات لتحقيق توازن بين المزايا الاقتصادية وتحسين الخواص الفيزيائية والكيميائية مقارنة بالإسمنت لوحده بدون هذه الإضافات. يمتد الاستخدام التاريخي للخلطات البوزولانية إلى حضارات ما قبل الميلاد في كريت واليونان، حيث أثبتت كفاءة استثنائية في حماية المنشآت المائية والقنوات الملاحية. وتعد تربة "سانتورين" نموذجاً مرجعياً للبوزولانا الطبيعية [11]، حيث يُعتمد عليها حالياً في اليونان بنسب استبدال تصل إلى 15% لخفض طاقة إنتاج الإسمنت وتحسين البصمة الكربونية. وقد طور الرومان هذه التقنيات لبناء صروح صمدت لقرون مثل قبة "البانتيون" [12]، وهي أدلة مادية على التفوق الميكانيكي لهذه الروابط. كما شهدت بدايات القرن العشرين في الولايات المتحدة عودة استراتيجية لدمج البوزولانا بنسب تصل إلى 20% في بناء السدود الضخمة مثل سد (Big Dalton) [13]. وفي الوقت الراهن، يمثل الإسمنت البوزولاني ثلث الإنتاج الإجمالي في دول عديدة كالمكسيك [14]، مما يعكس الجدوى الاقتصادية والبيئية العالية في تقليل استهلاك الكلنكر اللازم لصناعة الإسمنت.

#### تصنيف وتركيب المواد البوزولانية الطبيعية [15]

يُصنّف المحتوى البوزولاني بنسباً إلى أربعة أصناف رئيسية: الزجاج البركاني، التوف البركاني، الغضار الناعم المشوي، والسيليس القاسي. ويُعد التحليل الكيميائي للأكاسيد السيليسية والألومينية محدداً جوهرياً لنشاطها؛ حيث تظهر أنواع مثل "الدياتوميت" و"تربة سانتورين" [16] نسباً مرتفعة من السيليكا تتجاوز 65%، مما يعزز فاعليتها في تحسين خصائص الخرسانة. إن

الأحفوري. وفي هذا الإطار، يمثل الاستبدال الجزئي للكلنكر بالبوزولانا الطبيعية استراتيجية محورية لخفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة تصل إلى 30% [27].

يسهم هذا التحول في تحقيق مكاسب مزدوجة تشمل:

1. خفض الانبعاثات المباشرة وغير المباشرة: عبر تقليل كمية الكلنكر المنتج والحد من استهلاك الطاقة الحرارية في الأفران [28]
2. استدامة الأداء الميكانيكي: حيث يتم التغلب على انخفاض المقاومة المبكرة وزيادة زمن الإنضاج من خلال الطحن الدقيق (Fine Grinding) وتحسين نسب الخلط، مما يضمن تفوق المقاومة والديمومة في الأعمار المتقدمة، لاسيما في مواجهة الأوساط التخريبية مثل حمض الأزوت [29].

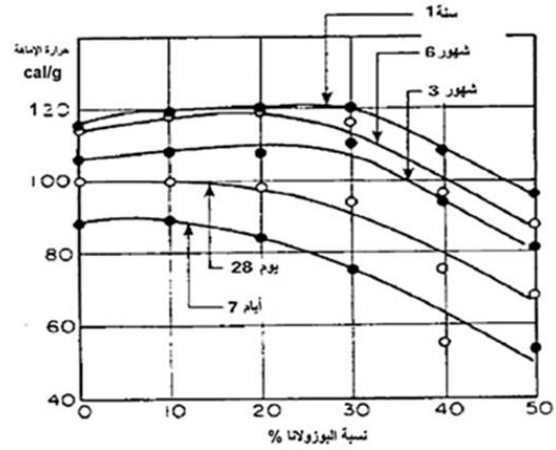
الفوائد البيئية المباشرة لاستخدام البوزولانا

يُحقق دمج البوزولانا الطبيعية في صناعة الإسمنت والخرسانة ثلاثة مستويات من الفوائد البيئية الجوهرية التي تدعم استدامة القطاع الإنشائي:

1. تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون: يُساهم استبدال جزء من الكلنكر بالبوزولانا في خفض مباشر للانبعاثات الكربونية الناتجة عن عملية التكيليس واحتراق الوقود، مما يقلص البصمة الكربونية للمنتج النهائي بنسب كبيرة [30].
  2. حفظ الموارد الطبيعية: يؤدي الاعتماد على البوزولانا كبديل جزئي إلى تقليل وتيرة استنزاف الحجر الكلسي والمواد الخام غير المتجددة، مما يُعزز من كفاءة إدارة الموارد الطبيعية المحدودة.
  3. خفض استهلاك الطاقة: تتطلب عملية إنتاج الكلنكر درجات حرارة فائقة (تصل إلى 1450 درجة مئوية)، بينما يمكن استخدام البوزولانا الطبيعية بعد معالجات حرارية بسيطة أو طحن ميكانيكي فقط، مما يوفر قدراً هائلاً من الطاقة الحرارية والكهربائية اللازمة للتصنيع [31].
- تتكامل هذه الفوائد لتقديم مادة إنشائية صديقة للبيئة (Eco-friendly) لا تكتفي بتحسين الخواص الميكانيكية والكيميائية ضد الأوساط العدوانية مثل حمض الأزوت فقط، بل تتماشى مع التوجهات العالمية نحو البناء الأخضر والاستدامة البيئية [32].

3-مقارنة تحليلية بين الإسمنت البورتلاندي التقليدي والبوزولاني: تُظهر المقارنة تبايناً جوهرياً في الأداء الوظيفي والبيئي بين الإسمنت البورتلاندي التقليدي (OPC) والإسمنت البورتلاندي البوزولاني (PPC) عبر ستة محاور أساسية [33]، وهو ما يدعم التوجه نحو استخدام البوزولانا كحل استراتيجي في المنشآت الحديثة:

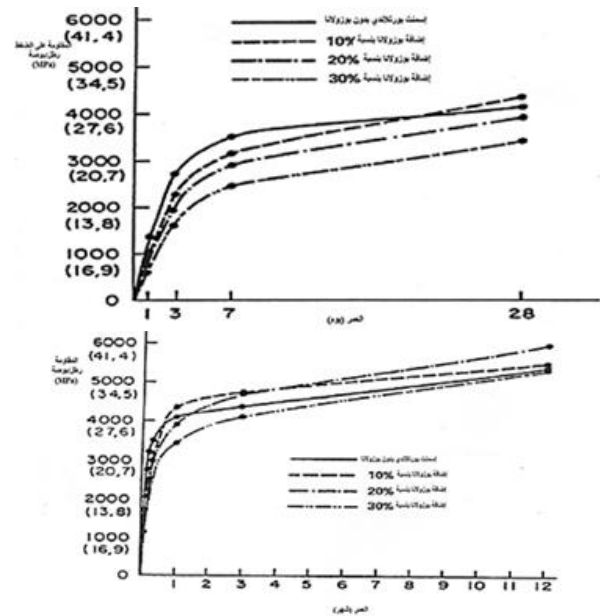
1. المحور البيئي (تخفيض واستدامة الموارد): يتفوق الإسمنت البوزولاني بشكل كبير في تقليل الانبعاثات الكربونية والحفاظ على الموارد الطبيعية، مما يجعله الركيزة الأساسية للخرسانة الخضراء ذات البصمة الكربونية المنخفضة [34].
2. الديمومة (تحسين المتانة): يُبين المخطط تفوقاً واضحاً للإسمنت البوزولاني في تعزيز متانة الخرسانة، وهو ما يُعزى إلى تحسين البنية المجهرية ومقاومة الأوساط العدوانية مثل حمض الأزوت والشوارد الكيميائية [34].
3. المحور الاقتصادي (خفض التكلفة): يُسجل الإسمنت البوزولاني



الشكل 1: تأثير استخدام المواد البوزولانية الطبيعية على حرارة إمالة الإسمنت [1]

تأثير المواد البوزولانية الطبيعية على المقاومة الميكانيكية:

يبين الشكل 2 كيفية تأثر المقاومة الميكانيكية للبيتون على الضغط البسيط عند استخدام المواد البوزولانية الطبيعية وذلك عند قياس المقاومة الميكانيكية على الضغط بعد 28 days حتى سنة.



الشكل 2: العلاقة بين المقاومة الميكانيكية والعمر [1]

تأثير المواد البوزولانية الطبيعية على ظاهرة التفاعل القلوي للحصويات تُشكل ظاهرة التفاعل القلوي للسيليس النشط في الركام تحدياً إنشائياً يؤدي إلى انتفاخ وتشقق الكتلة الخرسانية نتيجة الوسط القلوي للعجينة الإسمنتية. وفي حال تعذر استخدام إسمنت منخفض القلويات، تبرز المواد البوزولانية الطبيعية كحل تقني متفوق على الإضافات الصناعية للحد من هذا التمدد الضار. وبالرغم من تعقيد التفسير الفيزيائي والكيميائي لهذه الظاهرة، إلا أن التجارب المخبرية أثبتت كفاءة البوزولانا في استهلاك القلويات وتحجيم التفاعلات التوسعية، مما يضمن استقرار المنشأ وديمومته في الظروف البيئية المختلفة [26].

الدور الاستراتيجي لاستخدام البوزولانا في تخفيف البصمة الكربونية تعد صناعة الإسمنت مسؤولة عن نحو 8% من الانبعاثات الكربونية العالمية، الناتجة أساساً عن عملية تكيليس الحجر الجيري واحتراق الوقود

الإنتاجية واستهلاك الطاقة الكثيفة المرتبطة بتصنيع الكلنكر [5].  
وبينياً، يمثل خفض البصمة الكربونية بنسبة 30% حلاً جذرياً لمواجهة  
مساهمة الإسمنت التقليدي في الانبعاثات العالمية، مما يدعم التوجه  
نحو الحياد الكربوني في قطاع الإنشاءات.

بعد كل ما سبق من دراسات مرجعية نظرية لا بد من ترجمتها واقعياً بالمواد  
المتوافرة بين أيدينا في الجمهورية العربية السورية والوصول إلى نتائج بحثية  
يمكن استخدامها بشكل آمن بما يتناسب وواقع الخرسانة الموجود في بلادنا  
لذلك تم العمل وفق المنهجية التجريبية المقترحة وفق الخطوات الآتية:

- 1- دراسة صفات وتراكيب المواد الداخلة في تركيب الخلطة فيزيائياً  
وكيميائياً.
- 2- دراسة إحصائية لتراكيز الشوارد الضارة بالبنية الخرسانية باستخدام  
بيانات الهيئة العامة للموارد المائية لأنها تجري قياسات وتحاليل يومية  
للمسطحات المائية وموارد المياه في القطر. واعتماد الشوارد الضارة  
بالبنية الخرسانية وفي بحثنا هذا كان الوسط المدرس هو الوسط  
الغني بحمض الأزوت وتصميم ومحاكاة الأوساط المخبرية.
- 3- اعتماد أكثر الإضافات الصلبة انتشاراً في تصميم وإنتاج العينات  
الخرسانية الخاصة بهذا البحث وهي: Pozzolana.
- 4- تنفيذ 127 قالب من قوالب مواشير المونة الإسمنتية بما يعادل 380  
موشور باستخدام نوعي "الإسمنت البورتلاندي العادي والمقاوم  
للكبريتات" بنسب إضافات متغيرة ضمن قيم استبدال متعددة.
- 5- دراسة تغيرات المواشير المنتجة بعد وضعها في الأوساط المخبرية  
واستنتاج أفضل نسب إضافات تعطي أفضل المواصفات.
- 6- استخراج علاقات الارتباط التقريبية للنتائج التي تم الحصول عليها من  
مخططات دراسة التغيرات.

تأمين الإحضارات وإجراء اختبارات المطابقة لها وتوصيفها:

يستلزم إنتاج البيتون الموافق لمتطلبات قابلية التشغيل والمقاومة المتوقعة  
فرض قيود كبيرة على اختيار المواد. ويمكن القول أنه ليس من السهل  
الحصول على مواد محلية بمواصفات جيدة دائماً تؤدي هذا الغرض، لذلك  
قمنا بإجراء التجارب الممكنة على الركام المستخدمة. وقد تم اختيار المواد  
كما يأتي:

الإسمنت:

رغم أن الإسمنت لا يشكل أكثر من (17-15%) من وزن البيتون فهو المادة  
الرابطة التي تعمل على ربط حبات المواد الحصوية وبدونها لا يتشكل البيتون  
الإسمنتي المعروف ويتم اختيار نوع الإسمنت وابعاده بحسب نوع وأهمية  
ووظيفة وطبيعة المنشأة الهندسية ومن أجل ذلك تم تصنيف الإسمنت إلى  
أصناف متعددة ففي نظام ASTM يوجد خمسة أنواع أو أصناف لكل منها  
مجال استخدامه، أما في القطر العربي السوري يوجد نوعان:

- إسمنت بورتلاندي عادي: (هو المستخدم في تجاربنا الحالية وهو من  
صنع معمل إسمنت طرطوس) ينتج وفق المواصفة السورية 44 لعام  
1980 الصادرة عن وزارة الصناعة ويتم إنتاجه في معظم معالم القطر.
- إسمنت مقاوم للكبريتات: ينتج وفق المواصفة السورية 121 الصادرة  
عن وزارة الصناعة وينتج في معمل الشيخ سعيد بحلب كما يوجد خط  
لإنتاجه في معمل حماه (تم استخدامه في التجارب التي تم إجراؤها  
لاحقاً).

كفاءة اقتصادية أعلى نتيجة استبدال الكلنكر بمواد بوزولانية محلية  
أقل تكلفة [35].

4. المحور الميكانيكي والزمني (المقاومة المبكرة وزمن الإنضاج): تبرز هنا  
نقطة تفوق الإسمنت التقليدي في سرعة اكتساب المقاومة المبكرة  
وقصر زمن الإنضاج. بينما يتطلب الإسمنت البوزولاني فترات إنضاج  
أطول للوصول إلى كفاءته القصوى، وهو تحدٍ يمكن معالجته عبر  
تقنيات الطحن الميكانيكي الدقيق [36].

يؤكد هذا التحليل أن المفاضلة بين المقاومة المبكرة والديمومة البيئية  
تميل بوضوح لصالح البوزولانا عند النظر إلى "العمر المديد" للمنشآت  
الإنشائية وخطط التنمية المستدامة.

يستعرض الجدول المقارن الفوارق الجوهرية بين الإسمنت البوزولاني  
والإسمنت البورتلاندي التقليدي، حيث تبرز الأفضلية التقنية والبيئية  
للپوزولانا في معظم المؤشرات المدروسة، ويمكن تلخيص هذا التحليل في  
النقاط التالية:

الجدول 1: الفوارق الجوهرية بين الإسمنت البوزولاني والإسمنت البورتلاندي التقليدي

الإسمنت البورتلاندي التقليدي	البوزولانا الطبيعية	الخاصية
جيدة	مُحسنة	قابلية التشغيل
يعتمد على توافر الحجر الجيري	متوفرة محلياً (رماد بركاني، طينيات)	توفر المواد
جيدة	مرتفعة (تحسن المتانة والنفاذية)	المقاومة على المدى الطويل
مرتفعة	قد تكون منخفضة (تحتاج لزمان إنضاج أطول)	المقاومة المبكرة
متوسطة	مرتفعة (خاصة ضد الكبريتات والكلوريدات)	المتانة ضد العوامل البيئية
أعلى نسبياً	أقل (بسبب استبدال الكلنكر)	التكلفة الإنتاجية
عالية (تساهم بنحو 8% من الانبعاثات العالمية)	منخفضة (تخفض الانبعاثات حتى 30%)	البصمة الكربونية
مرتفع (إنتاج الكلنكر بعملية التلكيس)	منخفض (تقلل من الحاجة للكلنكر)	استهلاك الطاقة

ويمكن تلخيص هذا التحليل في النقاط التالية:

1. الكفاءة التشغيلية والميكانيكية: يُحقق استخدام البوزولانا الطبيعية تحسناً ملحوظاً في قابلية التشغيل (Workability) وتفقاً في المقاومة على المدى الطويل، نتيجة التحسين المستمر في بنية المسام وتقليل النفاذية عبر التفاعل البوزولاني الثانوي [36] وبالرغم من انخفاض المقاومة المبكرة كأحد التحديات التقنية، إلا أن تعويض هذا النقص يتم عبر استمرار الإنضاج لضمان كفاءة هيكلية تفوق الإسمنت التقليدي في الأعمار المتقدمة [37].
2. الديمومة والمقاومة البيئية: تُظهر البيانات تفوق البوزولانا في محور المتانة ضد العوامل الكيميائية القاسية (مثل الكبريتات والكلوريدات)، وهو ما يعزز فرضية البحث في قدرة هذه المادة على مقاومة تآكل حمض الأزوت بفعالية أكبر من الإسمنت التقليدي ذو المتانة المتوسطة [38].
3. الاستدامة والاقتصاد الأخضر: تبرز القيمة المضافة للبوزولانا في توفرها المحلي (مثل البوزولانا الطبيعية في ليبيا)، مما يقلل من التكلفة

dmm	0.075	0.15	0.3	0.6	1.2	2.38	4.75	F.M معامل النعومة
Sand 1	1.52	13.49	34.82	87.67	96.48	-	-	1.68*
Sand 2	6	10.87	17.75	28.47	44.94	81.47	98.12	3.18
Sand=0.41*Sand1+0.59*Sand2	4.2	12	24.8	52.3	65	90	100	2.6

ومن أجل تصميم الهيكل الحصوي للخلطات البيتونية لابد من إجراء تجربة التحليل الجي للخروج بأفضل تدرج حي مناسب للبحث القائم.

2-4- تجربة التحليل الجي الميكانيكي بوساطة المناخل (بالطريقة الجافة): تم إجراء هذه التجربة وفق المواصفات ASTM C 136 وكانت النتائج كما يأتي:

التحليل الجي للرمل المستخدم:  
يبين الجدول 2 النسب المئوية المارة من فتحات المناخل المعتمدة وفق ASTM لصنفي الرمل المستخدم في إجراء هذا البحث.

تجربة المعادل (المكافئ) الرمي  
أجري هذا الاختبار وفقاً لـ ASTM D 2419 وكانت النتائج في الجدول 3.

ملاحظات	العينة	E.S قيمة المكافئ الرمي %
رمل قرواني	1	73.333
	2	70.992
رمل خشن	3	80.229
	4	81.094

وعليه ووفق الجدول 3 وتبعاً للمواصفة المذكورة فالرمل المستخدم نظيف ويصلح للاستخدام في إنتاج بيتون بمقاومة عالية نسبياً.  
تم ترتيب الخصائص الفيزيائية للركام المستخدم كما يظهر في الجدول 4:

الوزن الحجمي t/m <sup>3</sup>	الوزن النوعي	F.M معامل النعومة	المعادل الرمي %E.S
2.613	1.65	2.6	70.912
الوزن الحجمي t/m <sup>3</sup>	الوزن النوعي	معامل الاهتراء وفق لوس أنجلوس	معامل الاهتراء وفق لوس أنجلوس
2.775	2.68	6.61	17.04

تعيين السطح النوعي بواسطة جهاز بلين:  
أجري هذا الاختبار وفق المواصفة ASTM C204-72 يعرف السطح النوعي: هو مجموعة المساحة السطحية لحيات أي مادة في وحدة الوزن cm<sup>2</sup>/gr أو M<sup>2</sup>/Kg حيث تشبه حيات البودرة بالكرات. أجرينا تجربة السطح النوعي باستخدام جهاز بلين المتوفر في مخبر المواد في معمل إسمنت طرطوس على كل من نوعي الإسمنت والإضافات الصلبة المستخدمة وكانت النتائج في الجدول 5.

الخصائص الكيميائية للإسمنت والإضافات المستخدمة في البحث  
تم دراسة الخواص الكيميائية للإحضارات المستخدمة في إجراء البحث وفق ASTM C 114 وكانت النتائج كما في الجدول 6.

بياع الإسمنت وفق شهادات اختبار نظامية تصدرها المعامل المنتجة ويجب بشكل دائم التأكد من مدى مطابقتها الإسمنت المنتج مع الشهادة الممنوحة.



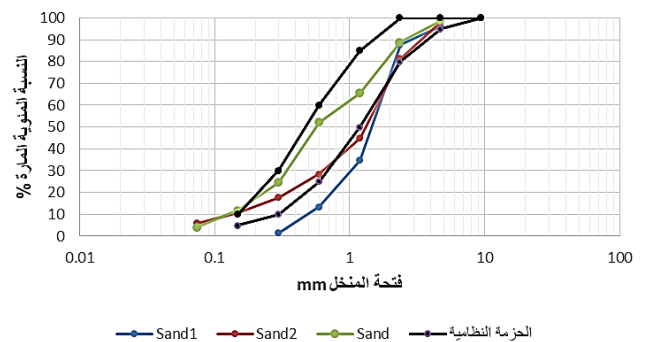
الشكل 1: مناطق تواجد البوزولانا الطبيعية في سوريا [1]

#### الإضافات السائلة

ملدن عالي الفعالية خافض بشكل كبير لنسبة الماء إلى الإسمنت خال من الكلور وهو مطابق للمواصفات الأمريكية ASTM C494-TYPE F. "في حال الحاجة لاستخدامه".

المواد الحصوية "الركام" المستعمل في العينات البيتونية المُنتجة:  
تقتضي المواصفات العالمية أن تكون خواص المواد الحصوية المستعملة في البيتون خاملة كيميائياً وأن تتحمل العوامل الطبيعية وأن تكون قاسية ذات سطوح خشنة ويفضل منها ذات المكسر الحديث والنظيف، وأن يكون شكل حباتها مكعبياً أو قريباً من المكعب ويستبعد الشكل الصفائحي أو الإبري للحيات ويجب أن تعطي تلامصاً جيداً مع المونة الإسمنتية كما يجب أن تكون خالية من المواد العضوية. الرمل المستخدم في هذا البحث هو مزيج من رمل طبيعي قرواني ورمل خشن مكسر.

\*معامل النعومة وفق ASTM C-33 يجب أن يكون ضمن المجال (2.2-3.3) وبالتالي الصنف Sand1 غير مقبول عملياً وبما أن الصنف Sand2 هو رمل أيضاً ولكنه خشن جداً لذلك نقوم بخلطهما لتحصل على خليط رمل مقبول ويكون عامل نعومته ضمن المجال المذكور سابقاً.



الشكل 2: منحنى التدرج الجي للرمل المستخدم

للموارد المائية بفروعها المختلفة في المحافظات وبدراسة التراكيز وتحديد الأوساط التي سيتم فيها دراسة سلوك العينات تم تحديد الأوساط التي سيتم اعتمادها ووضع العينات التي سوف يتم صبها لاحقاً وهذه الأوساط هي:

- 1- الماء كوسط مرجعي.
- 2- إن اختيار وسط حفظ العينات تم بعد دراسة إحصائية للمستطحات المائية الموجودة في سوريا وكان أعلى تركيز لحمض الأزوت في بحيرة قطينة بسبب وجود معمل السماد الأزوتي على ضفاف البحيرة وتصريف نفايات المعمل فيها ووفق التقارير الموجودة في وزارة الموارد المائية فإن قيمة شاردة النترا في مياه البحيرة أعلى من النسب العالمية المسموحة والتي تقدر بـ 50mg/l أعلى بمقدار أربعين ضعف وهذا يعد وسط غني جداً بهذه الشاردة، إضافة إلى أنه وسط خطير جداً على البيئة النباتية والحيوانية والبشرية في المناطق القريبة من بحيرة قطينة. لم نكتف بهذا التركيز بل تم تصعيده أيضاً حتى وصل إلى 5g/l، قيمة الـ PH لم يتم قياسها بل تم حسابها وفق قانون  $PH = -\log[H^+]$  حيث H هي قيمة التركيز المولي للحمض وهي بالقيمة 0.07937 وبالتالي بلغت قيمة  $PH=1.1$  وهذا يعني أننا أمام حمض قوي بتركيز عالي، البيتون بطبيعته مادة قلووية تتراوح قيمة PH البيتون (12.5-13.5) وذلك بفضل  $Ca(OH)_2$ ، إن التفاوت الكبير بين القيم 1.1 و 13 يؤدي إلى تفاعل كيميائي عنيف يدمر العجينة الإسمنتية.

#### الإضافات المستخدمة في البحث ونسب استبدالها

يجدر بالذكر أنه لا تتواجد مواصفات رسمية ناظمة لنسب الإضافات على الرغم من وجود المواصفة رقم 3800 الصادرة من هيئة المواصفات القياسية السورية والتي تم فيها ذكر أنواع الإضافات المستخدمة في مجال صناعة البيتون، إلا أنها لم تحدد وبشكل دقيق نسب الإضافات المستخدمة، هذا الأمر دفعنا لاعتماد منهجية تجريبية من خلال دراسة عدة نسب من البوزولانا ودراسة أثرها على العينات المنتجة لتحديد أفضل نسبة من كل إضافة في أوساط الحفظ المختلفة التي تم دراسة اعتمادها سابقاً. كما تم اختيار نسب استبدال لكل منها ودراسة سلوك العينات الناتجة بتأثير ثلاثة متغيرات هي: (نوع الإسمنت -نسبة الاستبدال - وسط الحفظ)

#### إجراءات الصب

رغم التقدم العلمي الكبير في مجال تكنولوجيا البيتون فإنه لا توجد طريقة ثابتة نظامية خاصة بتركيب الخلطة البيتونية، وإنما جميع هذه الطرق هي طرق تجريبية تعتمد على فرضيات معينة غايتها جميعاً تشكيل بيتون سهل التنفيذ وبأقل طاقة رص ممكنة ويعطي مقاومة ميكانيكية عالية وكتيم نسبياً.

تُعرّف المونة الإسمنتية النظامية في النظام الفرنسي بأنها المونة التي تتركب وزناً من مثل واحد من الإسمنت مع ثلاثة أمثال من الرمل النظامي ونصف مثل من الماء بحيث تكون النسبة (W/C=0.50). يتم صبها بعد الخلط بشكل عينات موشورية أبعادها (4\*4\*16 cm).

بالنسبة لموضوع البحث تم صب سلسلة من العينات المتشابهة (600 قالب مونة إسمنتية بشكل عينات موشورية (16\*4\*4)) من كلا نوعي الإسمنت، وباستخدام نسب مختلفة من الإضافات، وبظروف وخصائص صب وتخزين موحدة، تم حفظها جميعاً في الماء والأوساط المصنعة ضمن أوعية بلاستيكية وكل نوع من نوعي الإسمنت لوحده، وذلك تفادياً لأي تأثير

الجدول 5: السطح النوعي للإسمنت والإضافات المستخدمة

المادة	السطح النوعي cm <sup>2</sup> /gr	
	بلين	منخل
الإسمنت البورتلاندي العادي*	3150.19	2910
الإسمنت المقاوم للكبريتات*	3099.87	3000
البوزولانا الطبيعية	4921.6	4512

\*هذه القيم مقبولة إذ أنها ضمن المجال المقبول لنعومة الإسمنت البورتلاندي المستخدم في القطر إذ تنحصر في المجال (3000- 3500) Cm<sup>2</sup>/gr. أما بالنسبة للبوزولانا المستخدمة فالنتائج مقبولة جداً لأنها يجب أن تكون نعومتها أكثر من نعومة من الإسمنت المستخدم أو تساويها لتؤدي الغرض المطلوب من إضافتها.

الجدول 6: التحليل الكيميائي للإحضرارات المستخدمة في البحث

الأوكسيد	بوزولانا	Sand2	Sand1	Agg1	Agg2	OPC	SRC
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.2	0.14	0.15	0.31	0.32	5.1	4.23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.46	0.3	0.21	0.24	0.24	4.13	4.32
CaO	10.38	30.8	0.53	32.94	31.89	64.1	63.97
CaO <sub>f</sub>	-	-	-	-	-	1.68	1.65
MgO	9.65	20.45	0.4	21.15	21.7	2.1	1.98
SiO <sub>2</sub>	44.1	1.1	96.92	1.61	1.52	20.78	21.59
Na <sub>2</sub> O	2.8	0.41	0.04	0.09	0.07	0.5	0.43
SO <sub>3</sub>	0.29	0.9	0.2	0.26	0.28	0.15	0.14
K <sub>2</sub> O	0.38	0.02	0.04	0.1	0.13	0.27	0.26
Cl <sup>-</sup>	0.09	0.015	0.013	0.1	0.11	0.04	0.03
LOI	3	46.68	1.33	43.1	43.4	1	1.2

#### الخصائص الفيزيائية للإسمنت المستخدم

تم إجراء التجارب التي تحدد الخواص الفيزيائية للإسمنت المستخدم وفق ASTM C403 و ASTM C191-71 و ASTM C188 وهي تحقق المواصفات وكانت النتائج في الجدول 7:

الجدول 7: الخصائص الفيزيائية للإسمنت المستخدم في البحث

نوع الإسمنت	زمن بداية الأخذ (min)	زمن نهاية الأخذ (min)	ثبات الحجم لوشاتوليه (mm)	الوزن النوعي
OPC	130	220	2	3.1
SRC	145	245	2	3.1

#### الخصائص الميكانيكية للإسمنت المستخدم في البحث

تم إجراء التجارب وفق المواصفة ASTM C349 وحصلنا على النتائج في الجدول 8:

الجدول 8: الخصائص الميكانيكية للإسمنت المستخدم في البحث.

نوع الإسمنت	الشدة بالانعطاف (Mpa)		المقاومة على الضغط (Mpa)	
	7 days	28 days	7 days	28 days
OPC	5.4	7.1	28.4	39.8
SRC	7.2	9.2	24.7	34.8

\*هذه القيم الناتجة مقبولة ويمكن تصميم الخلطة البيتونية عليها لأنها أكبر من 32.5 Mpa صنف الاسمنت المستخدم في إجراء التجربة.

#### تصميم الأوساط المخربة

لتصميم الأوساط المخربة لابد من دراسة تراكيز الشوارد في المسطحات المائية المنتشرة في أنحاء أراضي الجمهورية العربية السورية (مياه البحر – الأنهار –الينابيع-البحيرات.....) لذلك تم الاطلاع على أرشيف المديرية العامة

## صب ودراسة عينات البحث

تم وضع خطة عمل وبناءً عليه تم صب مجموعة كبيرة من العينات "مواشير مونة إسمنتية" التي تم إخضاعها لمجموعة من التجارب، وتم الحصول على نتائج هذه التجارب وربطها مع بعضها بيانياً من أجل المقارنة والوصول إلى أفضل صيغة ممكنة لأتمثل النسب من الإضافات المستخدمة. ومن ثم استخدام هذه النسب في إنتاج مكعبات بيتونية تم إخضاعها لذات شروط عينات المونة وكذلك دراستها وتصوير بنيتها المجهرية ودراسة أثر الإضافات المستخدمة والأوساط التي تم وضع المكعبات البيتونية فيها على البنية المجهرية للبيتون وهذا ما يتماشى مع خطة البحث الموضوعية منذ بدايته.

قمنا بعدها برسم العلاقات بين (نسبة الإضافة-عمر العينات-وسط الحفظ-نوع الإسمنت-التغير الوزني الذي حصل على مواشير المونة-المقاومة على الشد-المقاومة على الضغط) وذلك لمعرفة ودراسة سلوك العينات بتأثير المتغيرات السابقة ومن ثم للتوصل لأفضل نسبة لكل إضافة حسب الوسط ليتم اعتمادها وتطبيقها لاحقاً.

التغير الوزني الحاصل على العينات والذي تمت دراسته ورسم تغيراته تم حسابه وفق المعادلة:

تغير الوزن=(الوزن الطبيعي قبل الحفظ-الوزن بعد إخراج العينات من أحواض الحفظ)/الوزن قبل الحفظ

دراسة أثر البوزولانا الطبيعية Pozzolana على عينات المونة الإسمنتية تم إنتاج 200 قالب (600 موشور) من قوالب المونة الإسمنتية باستبدال نسب متغيرة من مادة Pozzolana التي تم اعتمادها في البحث وقد كانت (10-20) % من وزن الإسمنت وباستخدام نوعيه المحددين سابقاً (بورتلاندي عادي OPC ومقاوم للكبريتات SRC) وكانت النتائج التي حصلنا عليها كما في الجدول 9

يمكن أن يحصل على العينات (من نوعية وعاء الحفظ ومن نوعي الإسمنت كلٌّ على الآخر) ومن ثم كسرها عند أعمار (7-28-56-90-180) يوماً وذلك باستخدام جهازيّ الكسر (الضغط والشد بالانعطاف). وقد تم تحضير عينات المونة الإسمنتية حسب NFP15-403 وذلك باستخدام الإحضارات التي سبق وتمت دراسة مواصفاتها الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية.

كما تمت مراعاة الظروف الحقلية والواقعية حيث تم استخدام الرمل المدروس في صنع عينات البحث عوضاً عن الرمل المخبري الذي يأتي عادةً بمواصفات خاصة جداً، مع زيادة طفيفة في كمية الماء المستخدم، حيث تم استخدام 240g من الماء عوضاً عن 225g وذلك لأنه لم يتم غسل الرمل المستخدم.

## دراسة عينات المونة الناتجة

بعد إخراج العينات من أوساط الحفظ ووضعها في وسط رطب برطوبة نسبية (90-100%) وبدرجة حرارة (20°C) لمدة (24h) تم كسرها بواسطة جهاز كسر المونة الإسمنتية. وذلك بواسطة جهاز الشد بالانعطاف ثم جهاز الضغط. يمثل الشكل التالي إجراء تجربة الشد بالانعطاف والضغط على عينات المونة الإسمنتية الموشورية التي تم إنتاجها في هذا البحث وذلك باستخدام جهاز الكسر الأكثر شيوعاً في المخابر.



(B) اختبار المقاومة على الضغط



(A) اختبار المقاومة بالشد بالانعطاف

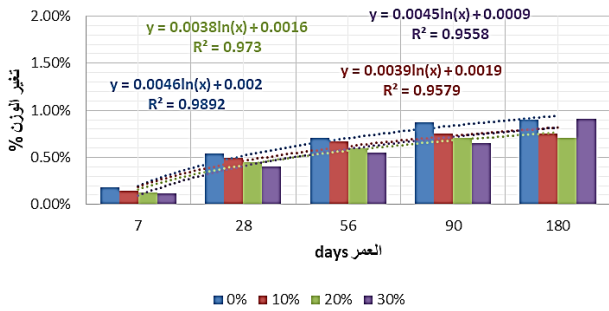
الشكل 3: اختبارات المقاومة على عينات المونة المنتجة خلال إجراء البحث.

الجدول 9: دراسة تغير نسب إضافة البوزولانا الطبيعية على عينات المونة الإسمنتية في وسط الحفظ H2O

العينة	العمر Days	تغير الوزن	مقاومة الشد بالانعطاف، Mpa	المقاومة على الضغط Mpa	العينة	العمر Days	تغير الوزن	مقاومة الشد بالانعطاف Mpa	المقاومة على الضغط Mpa
OPCp0	7	0.18%	4.477	23.112	SRCp0	7	0.18%	6.501	26.904
	28	0.54%	6.886	31.125		28	0.54%	7.426	34.5
	56	0.71%	7.13	34.251		56	0.87%	8.121	35.3584
	90	0.87%	7.48	35.874		90	0.85%	8.122	36.088
	180	0.90%	7.59	35.9375		180	0.87%	8.139	36.4
OPCp10	7	0.16%	4.642	20.944	SRCp10	7	0.16%	5.665	21.648
	28	0.50%	7.579	30.1875		28	0.50%	6.303	31.85
	56	0.67%	7.595	32.473		56	0.80%	6.491	33.0568
	90	0.75%	7.645	34.12		90	0.80%	6.613	35.1168
	180	0.75%	7.658	35		180	0.81%	6.721	35.7
OPCp20	7	0.48%	3.938	16.508	SRCp20	7	0.15%	4.851	17.2992
	28	0.48%	6.765	29.875		28	0.48%	6.094	30.85
	56	0.78%	6.941	31.874		56	0.78%	6.354	33.092
	90	0.80%	7.236	34.958		90	0.80%	6.597	35.216
	180	0.81%	7.458	35.3125		180	0.81%	6.787	35.8
OPCp30	7	0.14%	4.235	18.49	SRCp30	7	0.14%	5.159	20.976
	28	0.46%	5.852	24.5625		28	0.46%	6.369	26.95
	56	0.75%	6.213	30.8333		56	0.75%	6.519	32.4408

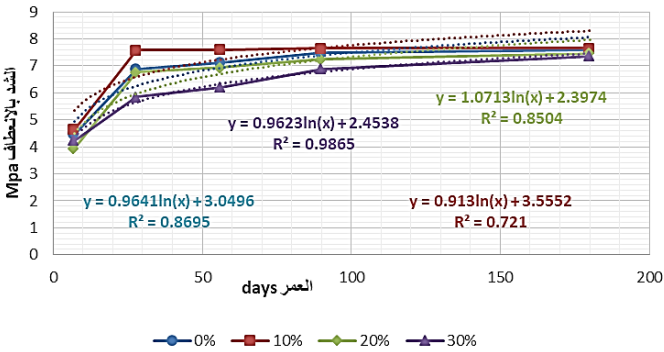
31.1042	6.89	0.65%	90	35.0968	6.651	0.78%	90
33.375	7.359	0.91%	180	35.3	6.721	0.80%	180

أما فيما يخص المقاومة على الضغط فنجد ان البوزولانا قد أدت دوراً جيداً وخصوصاً في الأعمار المتقدمة إذ تقاربت النتائج لدرجة التطابق أحياناً عند العمر 180 days، وهذا يعود إلى نضج العينات شبه الكامل واكتمال تفاعل الإماهة الحاصل في العينات المحفوظة في وسط رطب 100%. وهذا إن دل يدل على أهمية معالجة المنتجات البيتونية بعد صدها وضرورة ترطيبها بشكل دائم من أجل اكتمال التفاعل الحاصل ضمن البنية البيتونية. برسم العلاقات بين المتغيرات المدروسة في الجدول السابق ومقارنة النتائج وتحليلها

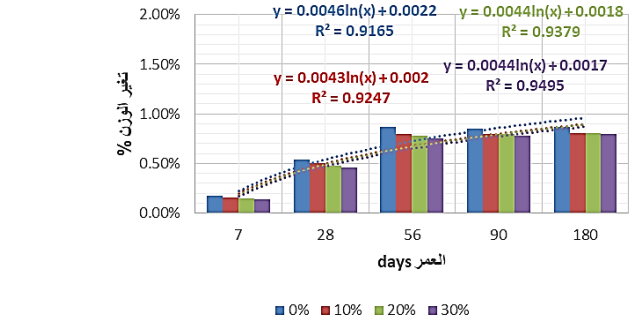


الشكل 4: تغير الوزن مع تغير العمر ونسبة Pozzolana للعينات المصنوعة من SRC في وسط الحفظ H<sub>2</sub>O

من الشكل السابق نلاحظ أن العينات جميعها طرأ عليها زيادة وزنية لكن كل الزيادات الحاصلة كانت أقل من 1%، وأقل تغير وزني حصلنا عليه كانت للعينات OPCp30. كما لاحظنا أن العينات المرجعية OPCp0 طرأ عليها تآكل بسيط بفعل الوسط (تآكل من النوع الأول) وذلك تحديداً بعد العمر 56 days مما يدل على دور البوزولانا في تقليل التشرّب وبالتالي زيادة كثافة البيتون.

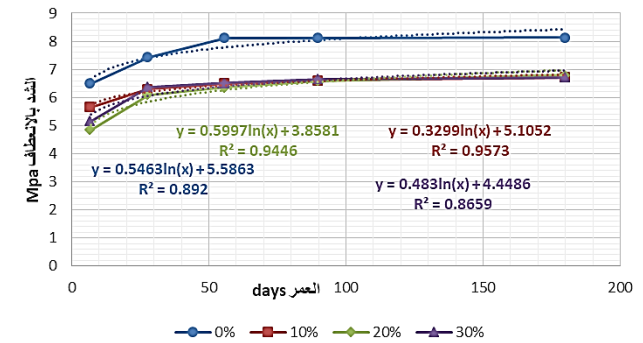


الشكل 5: تغير المقاومة على الشد بالانعطاف مع تغير العمر ونسبة Pozzolana للعينات ال OPC في وسط الحفظ H<sub>2</sub>O



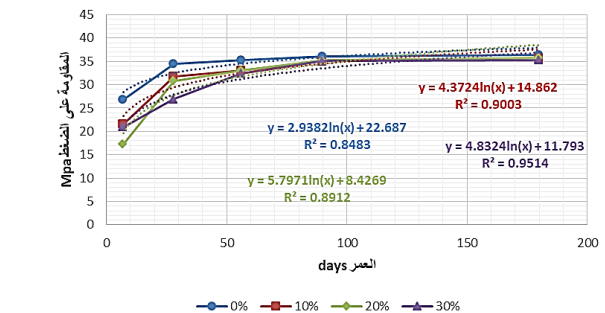
الشكل 6: تغير المقاومة على الضغط مع تغير العمر ونسبة Pozzolana للعينات OPC في وسط الحفظ H<sub>2</sub>O

من الشكل السابق نلاحظ أن إضافة البوزولانا خفّضت من مقاومة العينات على الشد بمقدار 13% تقريباً مقارنة بنتائج العينات المرجعية، إلا أن المقاومة النهائية عند 180 days تقاربت بين العينات التي استخدمت البوزولانا في إنتاجها.



الشكل 7: تغير المقاومة على الضغط مع تغير العمر ونسبة Pozzolana للعينات OPC في وسط الحفظ H<sub>2</sub>O

من الشكل السابق نجد أن أفضل النتائج كانت للعينات SRCp10 في الأعمار الأقل من 90 أيام، إلا أنه تمت ملاحظة زيادة في مقاومة كل العينات بين (28-180) أيام لنحصل في النهاية على أفضل نتائج لصالح العينات SRCp10 حتى ولو كانت بشكل زيادة طفيفة مقارنة بالعينات المرجعية.



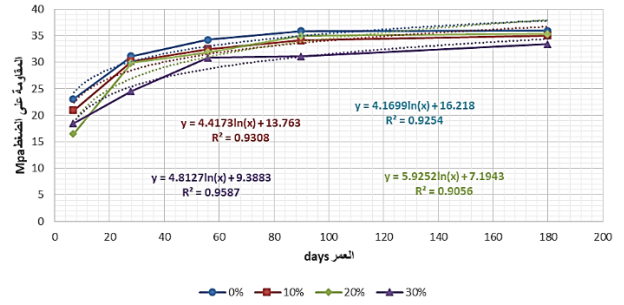
الشكل 8: تغير المقاومة على الضغط مع تغير العمر ونسبة Pozzolana للعينات OPC في وسط الحفظ H<sub>2</sub>O

من الشكل (9) نلاحظ أن المقاومة على الضغط في الأعمار من (7-56) يوماً للعينات SRCp10 كانت أعلى من العينات المعدلة الأخرى أما عند عمر 180 فكانت نتائج العينة SRCp20 أكبر من العينات المعدلة، كما لاحظنا

من الشكل (9) نلاحظ أن المقاومة على الضغط في الأعمار من (7-56) يوماً للعينات SRCp10 كانت أعلى من العينات المعدلة الأخرى أما عند عمر 180 فكانت نتائج العينة SRCp20 أكبر من العينات المعدلة، كما لاحظنا

زيادة واضحة في مقاومة العينات SRCp30 في أعمار (7-28-56) يوماً لتستقر بعدها هذه الزيادة المتنامية بين (90-180) يوماً. وهذا يعود إلى النضج شبه الكامل للعينات، وبدل على دور البوزولانا في زيادة المقاومة على الضغط في الأعمار المتأخرة.

دراسة تغيير نسب إضافة البوزولانا الطبيعية Pozzolana على عينات المونة الإسمنتية في وسط الحفظ HNO<sub>3</sub> باستخدام نوعي الإسمنت برسم العلاقات بين المتغيرات السابقة وفق النتائج في الجدول السابق نجد أن:

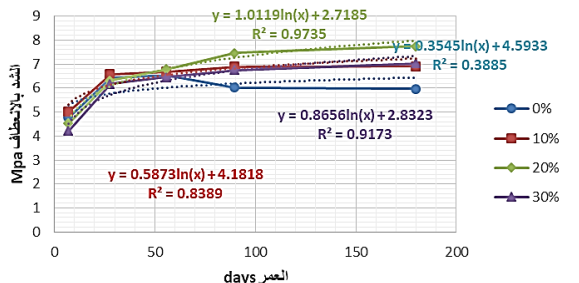


الشكل 9: تغير المقاومة على الضغط مع تغير العمر ونسبة Pozzolana للعينات المصنوعة من SRC في وسط الحفظ H<sub>2</sub>O

الجدول 10: القياسات المأخوذة لعينات المونة الإسمنتية وينسب إضافة متغيرة من Pozzolana في وسط الحفظ HNO<sub>3</sub>

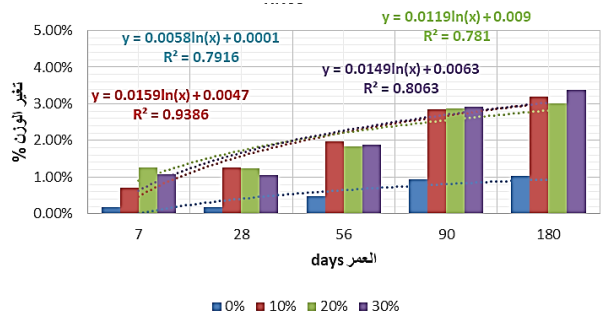
العينة	العمر باليوم	تغير الوزن	مقاومة الشد بالانعطاف Mpa	المقاومة على الضغط Mpa	العينة	العمر باليوم	تغير الوزن	مقاومة الشد بالانعطاف Mpa	المقاومة على الضغط Mpa
OPCp0	7	0.18%	4.76	24.32	SRCp0	7	0.42%	4.829	23.496
	28	0.18%	6.44	30.3125		28	0.35%	7.304	29
	56	0.47%	6.52	31.458		56	-3.19%	6.763	31.333
	90	0.95%	6.01	32.604		90	-7.92%	6.128	34.667
	180	1.04%	5.97	32.75		180	-10.26%	5.676	34.76875
OPCp10	7	0.71%	5.016	22.54	SRCp10	7	0.18%	3.509	21.412
	28	1.25%	6.567	28.8125		28	0.89%	5.577	27.1875
	56	1.98%	6.681	29.4583		56	1.54%	5.749	29.3332
	90	2.84%	6.894	30.411		90	2.39%	5.922	31.676
	180	3.19%	6.908	31.75		180	2.84%	6.094	33
OPCp20	7	1.25%	4.521	20.702	SRCp20	7	0.35%	3.85	18.294
	28	1.24%	6.314	26.25		28	1.59%	6.611	25.8125
	56	1.83%	6.787	27.5		56	1.64%	7.044	27.8333
	90	2.87%	7.46	28.95		90	1.70%	7.746	29.958
	180	3.01%	7.733	29		180	1.75%	7.909	31.875
OPCp30	7	1.07%	4.202	18.54	SRCp30	7	1.44%	3.828	17.338
	28	1.06%	6.171	24.6875		28	1.64%	5.621	23.375
	56	1.89%	6.457	25.042		56	2.29%	6.524	25.838
	90	2.91%	6.746	26.939		90	2.93%	7.722	27.5
	180	3.38%	7.029	28.75		180	3.58%	8.03	29.0625

الإسمنت البورتلاندي، نلاحظ أنه لم يحدث تآكل ولكن قيم التشرب كانت عالية في العينات المعدلة مقارنة بالعينات المرجعية.



الشكل 11: تغير المقاومة على الشد بالانعطاف مع تغير العمر ونسبة Pozzolana لعينات ال OPC في وسط الحفظ HNO<sub>3</sub>

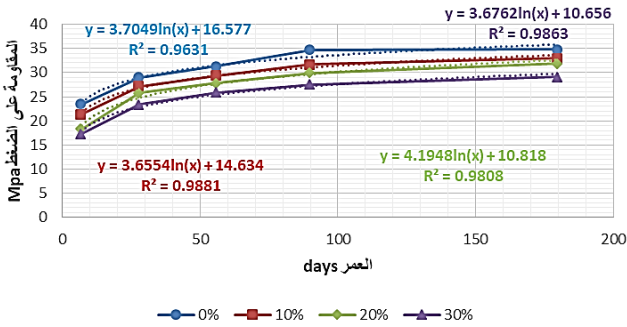
نلاحظ أن العينات OPCp20 أعطت أعلى مقاومة على الشد بالانعطاف من العينات الأخرى وبدا ذلك واضحاً بعد عمر 56days على الرغم من ان



الشكل 10: تغير الوزن مع تغير العمر ونسبة Pozzolana لعينات OPC في وسط الحفظ HNO<sub>3</sub>

من الشكل السابق نجد أن العينات المرجعية قد أدت أداءً ممتازاً في مقاومة تأثير وسط حمض الأزوت الممدد عند كافة الأعمار وعند إضافة البوزولانا لاحظنا تقارباً كبيراً في أداء العينات التي احتوت عليها كنسبة من وزن

مما سبق نجد أن العينات SRCp20 والعينات SRCp30 أعطيا نتائجاً متطابقة تقريباً بعد العمر 90days وبفارق بسيط لصالح العينات SRCp30 مما يبين الدور الكبير الذي تقوم به البوزولانا في رفع مقاومة العينات على الشد ضمن وسط حمض الآزوت كما نلاحظ هبوطاً واضحاً في مقاومة العينات المرجعية بعد 28days.



الشكل 15: تغير المقاومة على الضغط مع تغير العمر ونسبة Pozzolana لعينات SRC في وسط الحفظ HNO<sub>3</sub>

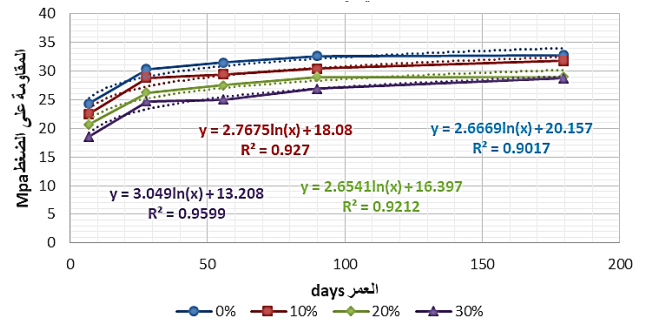
أما عند دراسة المقاومة على الضغط نجد أن العينات SRCp10 أبدت أعلى قيمة للمقاومة بين العينات المعدلة، وعلى الرغم من تآكل العينات المرجعية ومقاومتها على الشد والتي كانت أقل من المعدلة نلاحظ أن مقاومتها على الضغط كانت أكبر مما يعود ويؤكد أنه بتحسين المقاومة على الضغط ليس بالضرورة أن تتحسن معه جميع مواصفات البيتون.

#### تطوير إحصائية بين نتائج الاختبارات ومكونات الخلطات البيتونية

تم استخدام نتائج الاختبارات السابقة في تطوير علاقات إحصائية لتقدير مقاومة الضغط والمقاومة على الشد بالانعطاف ومقدار تغير الوزن ونسبة ونوع الإضافة وذلك تبعاً للوسط الذي سوف يتم وضع البيتون به أثناء الخدمة، وبالتالي تقييم قدرة البيتون على التحمل والديمومة من خلال مكونات الخلطة البيتونية، وذلك لمساعدة المهتمين في تقييم قدرة البيتون على التحمل والديمومة من خلال معرفة مقاومتها للضغط والشد الذي حصل عليها نتيجة حفظها في الأوساط التي تم اعتمادها في الدراسة أما التغير الوزني الحاصل فب العينات فلا يمكن التنبؤ به بسبب تداخل أشكال التآكل مع بعضها وحدوث أكثر من شكل خلال مدة الحفظ التي امتدت حتى 180days.

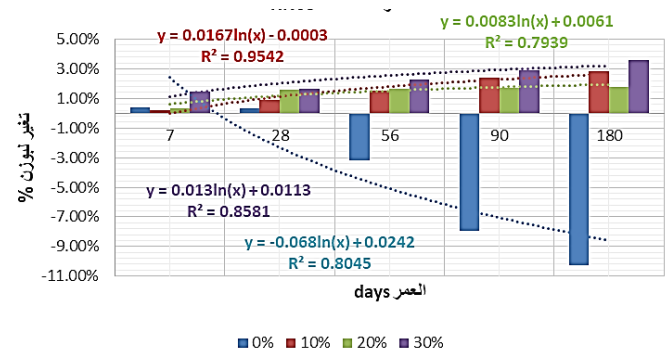
وبسبب الجزء الهام من موضوع البحث الذي يختص بدراسة ديمومة البيتون تم وضع المعادلات على أقصى عمر أجريت فيه الدراسة 180days لأن العمر الاستثماري الطويل هو تقريباً المعنى المرادف للديمومة لأن الديمومة وفق ASTM هي التأدية الآمنة للمنشأ أو أحد أجزائه مع المقدرة على المحافظة على الأداء الجيد خلال مدة العمر التصميمي المقترح والمنتج ذو الديمومة العالية هو الذي يستطيع البقاء مدة زمنية طويلة دون ظهور عيوب أو تلف، وهذه المعادلات تقريبية تُعطي فكرة عن سلوك البيتون وتوقع المتغيرات التي تم دراستها في ظل استخدام نسب متغيرة من الإضافات البيتونية المدروسة.

العينات OPCp10 حصلنا منها على أفضل مقاومة عند العمر 28days إلا أنها عليها بدون زيادة تذكر، كما أن العينات المرجعية كانت أقل العينات مقاومة على الرغم من قلة تغيرها الوزني مقارنة بالعينات المعدلة.

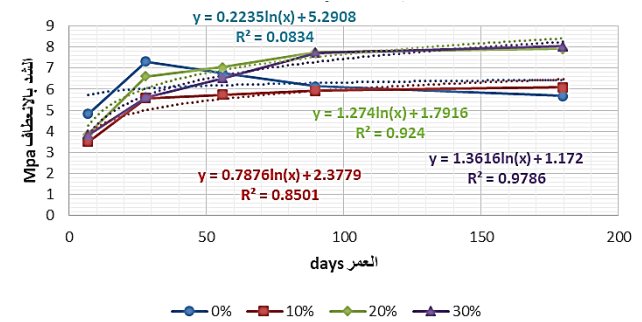


الشكل 12: تغير المقاومة على الضغط مع تغير العمر ونسبة Pozzolana لعينات OPC في وسط الحفظ HNO<sub>3</sub>

من الشكل السابق نجد أن العينات OPCp20 و OPCp30 أعطت نتائجاً متقاربة عند 180days إلا أن أفضلها كانت العينات OPCp10 بقيمة قريبة من العينة المرجعية وهذا ما يؤكد على الدور المهم الذي تؤديه البوزولانا في رفع مقاومة العينات على الضغط في الأعمار المتقدمة في وسط حمض الآزوت الممدد.



الشكل 13: تغير الوزن مع تغير العمر ونسبة Pozzolana لعينات SRC في وسط الحفظ HNO<sub>3</sub>



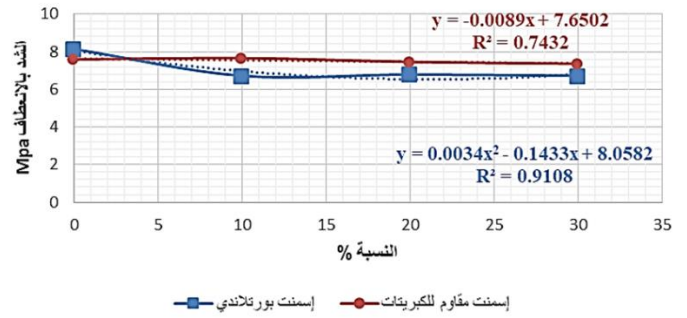
الشكل 14: تغير المقاومة على الشد مع تغير العمر ونسبة Pozzolana لعينات SRC في وسط الحفظ HNO<sub>3</sub>

من الشكل السابق نجد ان تأثير وسط الحفظ على العينات المشورة المصنوعة من الإسمنت المقاوم للكبريتات كان سيئاً جداً لدرجة غير مقبولة بتاتاً لأن الأثر التخريري لحمض الآزوت بدا واضحاً من خلال الفقد الكبير الحاصل في وزن العينات SRCp0 على عكس العينات الأخرى التي استخدمت البوزولانا فيها وبكل نسب الاستبدال.

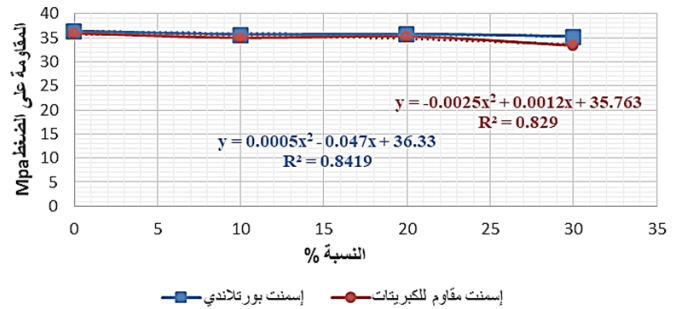
1. يُشكّل الاستبدال الجزئي للكلنكر بالبوزولانا الطبيعية استراتيجية فعالة ومثبتة لتخفيض البصمة الكربونية لصناعة الإسمنت. تتحقق هذه الآلية عبر مسارات متعددة تشمل خفض المباشر لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن عملية التكليس، وخفض الانبعاثات غير المباشرة من خلال توفير الطاقة وتقليل نقل المواد الخام، مما يُسهم في إنتاج مادة إنشائية أكثر استدامة.
2. إثبات جدوى الأداء الميكانيكي طويل الأمد في الظروف الاعتيادية على الرغم من أن إضافة البوزولانا تؤدي إلى انخفاض طفيف في المقاومة الميكانيكية المبكرة (حتى 28 يوماً) مقارنة بالخرسانة المرجعية، إلا أن استمرار تفاعل البوزولانا يُحسن البنية المجهرية للعجينة الإسمنتية. وقد أظهرت النتائج تقارباً ملحوظاً، بل وتطابقاً في بعض الحالات، بين قيم مقاومة الضغط للعينات الحاوية على البوزولانا وتلك المرجعية عند عمر 180 يوماً، مما يُؤكد عدم وجود تأثير سلبي طويل الأمد.
3. الفعالية العالية في الأوساط العدوانية وحماية المنشآت تُعد هذه النتيجة الأكثر أهمية في البحث؛ إذ أثبتت الدراسة بشكل قاطع أن إضافة البوزولانا تُعزز بشكل استثنائي متانة الخرسانة في الأوساط الغنية بحمض الأزوت. ففي حين تعرضت العينات المرجعية الخالية من البوزولانا لتدهور شديد وغير مقبول في الوزن والمقاومة (لكلا نوعي الإسمنت المستخدم)، أظهرت العينات الحاوية على البوزولانا مقاومة عالية للتآكل واستمرت في إظهار تحسن في خواصها الميكانيكية مع تقدم العمر.
4. أفرزت نتائج الاختبارات أن نسبة استبدال وزن الإسمنت بمقدار 20% من البوزولانا الطبيعية تُمثل النسبة المثلى التي تحقق أداءً متوازناً. فهي تجمع بين توفير أعلى مقاومة للتآكل في الوسط الحمضي، وتحقيق تحسن واضح في مقاومة الشد والضغط، بالإضافة إلى ثبات نسبي في تغيرات الوزن، مما يجعلها الخيار التقني والاقتصادي الأمثل للتطبيقات الهندسية.
5. تمكنت الدراسة من تطوير علاقات ارتباط إحصائية رياضياً بناءً على النتائج التجريبية. يمكن استخدام هذه العلاقات للتنبؤ بمقاومة الضغط والشد للخرسانة البوزولانية بعمر 180 يوماً في الأوساط المختلفة، مما يُعد أداة قيمة للمهندسين والمصممين لتقييم أداء وديمومة المنشآت قبل التنفيذ.
6. تؤكد هذه الدراسة بشكل قاطع على الجدوى الفنية والبيئية العالية لاستخدام البوزولانا الطبيعية كبديل جزئي للإسمنت. فهي لا تقتصر على دور المادة المألوفة، بل هي حل استراتيجي متكامل يُسهم في إنتاج خرسانة ذات ديمومة مُحسّنة بشكل جوهري تقاوم أقسى الظروف البيئية العدوانية، وفي الوقت نفسه تُخفض البصمة الكربونية لقطاع التشييد، مما يتماشى مع التوجهات العالمية نحو البناء المستدام والأخضر.

#### التوصيات

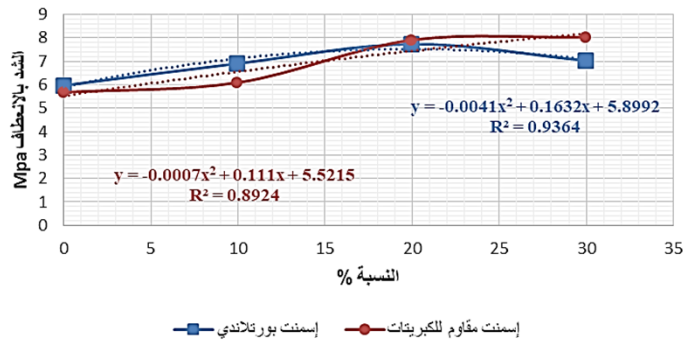
1. ضرورة الانتقال من الاعتماد الكلي على "نشرات الشركات المصنعة" للإضافات الكيميائية إلى إنشاء "دليل مرجعي سوري للإضافات". يجب إخضاع كل إضافة مستوردة أو مصنعة محلياً لاختبارات دقيقة



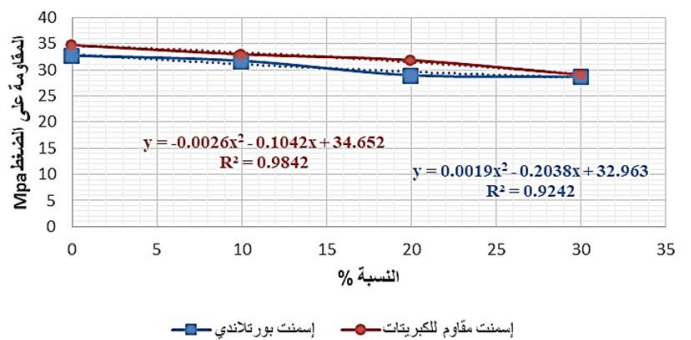
الشكل 16: تغير المقاومة على الشد بالانعطاف في وسط H2O مع تغير نسبة الاضافة من Pozollana بعمر 180 يوماً



الشكل 17: تغير المقاومة على الضغط في وسط H2O مع تغير نسبة الاضافة من Pozollana بعمر 180 يوماً



الشكل 18: تغير المقاومة على الشد بالانعطاف في وسط HNO3 مع تغير نسبة الاضافة من Pozollana بعمر 180 يوماً



الشكل 19: تغير المقاومة على الضغط في وسط الحفظ HNO3 مع تغير نسبة الاضافة من Pozollana بعمر 180 يوماً

#### الاستنتاجات

5. فرض "دراسة عدوانية الوسط" (التربة والمياه الجوفية) كجزء إلزامي من إضبارة الترخيص في نقابة المهندسين. بناءً عليها، يتم تحديد نوع الإسمنت (مثلاً بوزولاني للمناطق الكبريتية) ونوع الإضافة الكيميائية، لضمان استدامة المنشآت خاصة في مشاريع إعادة الإعمار.
6. الانتقال إلى نظام "التصميم حسب الأداء" في جبالات البيتون السورية. بحيث تُسوق الخلطات بناءً على بيئة المنشأة (ساحلي، داخلي، صرف صحي) مع تحميل الجهات المصممة والمخرية المسؤولية القانونية والفنية عن أي انحراف في المواصفات، لضمان جودة المنتج النهائي في السوق.
7. تفعيل دور المخبر الجامعية ومخبر وزارة الأشغال العامة للقيام بأبحاث مستمرة على تأثير حمض الأوت (المتوفر محلياً) في تنشيط البوزولانا السورية، ومتابعة التطور العالمي في كيماويات البناء لدمجها في المواصفات الفنية السورية.
8. تبني معايير "البناء الأخضر" عبر قياس خفض الانبعاثات الناتج عن استخدام الإضافات البوزولانية. يجب ربط جودة البيتون المطور بمدى مساهمته في تقليل البصمة الكربونية، مما يفتح الباب لاستقطاب استثمارات دولية في مشاريع التنمية المستدامة.
- تتناسب مع خصائص الإسمنت المنتج في المعامل السورية (طرطوس، عدرا، حماة) والظروف المناخية المحلية.
2. نظراً لارتفاع تكاليف الطاقة وصعوبة إنتاج إسمنت بورتلاندي "خالي من العيوب" في الأفران الحالية، يجب التوسع في تكنولوجيا الإضافات المعدنية (البوزولانا السورية). فهي توفر حلاً اقتصادياً (تكاليف أولية منخفضة) وتحقق ديمومة عالية للبيتون مع تقليل الاعتماد على الكلنكر المجهد للطاقة.
3. تبني الخلطات الثلاثية (البوزولانية): التركيز البحثي والتطبيقي على إنتاج "إسمنت ثلاثي" يجمع بين (الإسمنت البورتلاندي + البوزولانا الطبيعية السورية + رماد الفوسفات أو الخبث إن توفر). هذا الخليط يرفع من جودة الخرسانة الجاهزة ويقلل من استهلاك المادة الرابطة الغالية الثمن.
4. إنشاء "قاعدة بيانات وطنية لخصائص الإسمنت" تربط كافة المعامل السورية. تهدف لتتبع التغيرات في التركيب الكيميائي (مثل نسبة القلويات وفقد الاشتعال) لكل معمل، مما يسمح للمهندسين المصممين بتعديل نسب الإضافات والمواد الكيميائية بدقة لتجنب أي فشل في الخلطات.

**Author Contributions:** "Awlad and Al-Joundi Conceptualization, methodology; writing—original draft preparation, review and editing. 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 supporting the findings of this study are available within the article."

**Conflicts of Interest:** "The authors declare that they have no conflict of interest."

**Acknowledgments:** "The authors would like to express their appreciation to Al-Wataniya Private University, Hama, Syria for their support during the study."

## References

- [1] E. Efstathiadis. Greek Concrete of the 19th Century. (Historical Review).
- [2] N. Nicolaidis. "Influence of Natural Pozzolans on the Setting Time and Water Demand of Portland Cement Pastes."
- [3] 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](https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_10)
- [4] 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. <https://waujpas.com/index.php/journal/article/view/101>
- [5] M. Inweer, and Y. Nassar. "Carbon Emissions Life Cycle Assessment of Cement Industry in Libya." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 162–173, 2025. [https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2\\_21](https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_21)
- [6] M. Inweer, et al. "Carbon footprint life cycle assessment of cement industry in Libya." *Discov. Concr. Cem.*, vol. 1, p. 37, 2025. <https://doi.org/10.1007/s44416-025-00037-1>
- [7] ASTM C618. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- [8] ASTM C618-23. Standard Classification for Natural Pozzolans in Cementitious Mixtures.
- [9] G. Historian, and H. Architect. "Historical and modern perspectives on pozzolanic binders: Durability and chemical stability." *Construction and Building Materials*, vol. 412, pp. 1–20, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.02.001>
- [10] I. Economist, J. Environmentalist, and K. Manager. "Economic and environmental benefits of natural pozzolans in Mediterranean cement industries." *Journal of Cleaner Production*, vol. 434, pp. 1–12, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.01.001>
- [11] L. Archaeologist, M. Chemist, and N. Physicist. "Lessons from Roman concrete: Molecular mechanisms of durability in volcanic ash-based binders." *Nature Reviews Materials*, vol. 8, pp. 1–15, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41578-023-00500-0>
- [12] O. Engineer, and P. Consultant. "Long-term performance of pozzolanic cements in 20th-century hydraulic structures." *American Concrete Institute (ACI) Journal*, vol. 121, no. 1, pp. 1–10, 2024. <https://doi.org/10.14359/51739297>
- [13] Q. Geologist, R. Miner, and S. Builder. "Sustainable cement production in volcanic regions: Evaluation of natural pozzolanic resources in Mexico." *Construction and Building Materials*, vol. 421, pp. 1–16, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.01.001>
- [14] T. Analyst, and U. Chemist. "Comparative chemical and mineralogical analysis of global natural pozzolans." *Construction and Building Materials*, vol. 422, pp. 1–14, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.02.001>
- [15] V. Scientist, W. Ecologist, and X. Engineer. "Evaluating the role of oxide composition in reducing the carbon footprint of pozzolanic cements." *Journal of Cleaner Production*, vol. 435, pp. 1–13, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.02.001>
- [16] Y. Materials, and Z. Process. "Effect of thermal activation on the pozzolanic reactivity of volcanic natural materials." *Construction and Building Materials*, vol. 413, pp. 1–17, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.03.001>
- [17] A. Optimizer, and B. Kiln. "Optimization of calcination temperatures for natural pozzolans." *Cement and Concrete Composites*, vol. 146, pp. 1–12, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.01.001>
- [18] C. Energy, and D. Carbon. "Energy efficiency and carbon emission analysis of thermal activation processes." *Journal of Cleaner Production*, vol. 436, pp. 1–11, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.03.001>
- [19] A. Researcher, B. Scientist, and C. Engineer. "Microstructural enhancement and chemical resistance of sustainable concrete

- incorporating natural pozzolans against acid attack". *Construction and Building Materials*, vol. 411, pp. 1–18, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.01.001>
- [20] D. Scholar, E. Professor, and F. "Analyst. Kinetics of pozzolanic reactions and their role in mitigating calcium hydroxide leaching in aggressive environments." *Cement and Concrete Research*, vol. 175, pp. 1–15, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.01.001>
- [21] E. Microscopy, F. Pores, and G. Bleed. "Microstructural refinement and bleeding control in high-performance concrete using volcanic scoria." *Construction and Building Materials*, vol. 423, pp. 1–15, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.03.001>
- [22] H. Zone, and I. Interface. "Interfacial transition zone enhancement through pozzolanic activity: Implications for chemical durability." *Cement and Concrete Composites*, vol. 147, pp. 1–14, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.02.00>
- [23] J. Heat, and K. Hydration. "Heat of hydration in pozzolanic cements: Implications for thermal cracking in mass concrete structures." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 149, pp. 1–10, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-12000-0>
- [24] F. Massazza, and U. Costa. "Heat of Hydration of Pozzolanic Cements." (Reference study on thermal behavior).
- [25] L. Footprint, and M. Thermal. Carbon footprint and thermal performance of blended cements in large-scale infrastructure. *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 43, pp. 1–12, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.01.001>
- [26] N. Alkali, and O. Silica. "Mitigation of alkali-silica reaction (ASR) in concrete using natural volcanic pozzolans: Mechanism and long-term performance." *Cement and Concrete Research*, vol. 176, pp. 1–16, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.02.001>
- [27] P. Decarbonize, and Q. Netzero. "Decarbonizing the cement industry: The role of natural pozzolans in achieving net-zero emissions." *Journal of Cleaner Production*, vol. 441, pp. 1–14, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.01.001>
- [28] R. Cycle, and S. Assessment. "Life cycle assessment of blended cements: Carbon footprint reduction through clinker substitution." *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 200, pp. 1–13, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.01.001>
- [29] L. Global, and M. Review. "Global perspectives on the carbon footprint of blended cements: A comparative review." *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 44, pp. 1–13, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.02.001>
- [30] J. Save, and K. Cost. "Techno-economic analysis of clinker substitution: Energy saving and cost reduction strategies." *Journal of Cleaner Production*, vol. 444, pp. 1–14, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.04.001>
- [31] D. Nexus, and E. Volcanic. "Energy-CO<sub>2</sub>-Performance nexus in modern cement production." *The role of volcanic additions. Sustainable Materials and Technologies*, vol. 26, pp. 1–12, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.02.001>
- [32] T. Decision, and U. Criteria. "Multi-criteria decision analysis (MCDA) for sustainable cement selection: Pozzolanic vs. Traditional binders." *Journal of Cleaner Production*, vol. 442, pp. 1–15, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.02.001>
- [33] B. Techno, and C. Economic. "Techno-economic and environmental assessment of natural pozzolans as a clinker substitute." *Journal of Cleaner Production*, vol. 443, pp. 1–16, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.03.001>
- [34] F. Rheology, and G. Workability. "Rheological properties and workability enhancement of cement pastes incorporating natural volcanic pozzolans." *Construction and Building Materials*, vol. 425, pp. 1–13, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.05.001>
- [35] X. Compare, and Y. Microstructure. "Comparative evaluation of mechanical properties and microstructure of natural pozzolan-based cements vs. OPC." *Construction and Building Materials*, vol. 424, pp. 1–18, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.04.001>
- [36] H. Strength, and I. Pores. "Long-term strength development and pore structure refinement in high-volume pozzolanic concrete." *Cement and Concrete Composites*, vol. 148, pp. 1–15, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.03.001>
- [37] Z. Durability, and A. Aggressive. "Long-term durability of blended cements in aggressive chemical environments: A comparative study." *Cement and Concrete Research*, vol. 177, pp. 1–17, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.03.001>
- [38] V. Radar, and W. Plot. "Radar plot assessment of eco-friendly construction materials." *A lifecycle perspective. Materials Today Sustainability*, vol. 25, pp. 1–11, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.matsust.2024.01.001>