

Evaluating the Pozzolanic Efficacy of Waste Ceramic Powder as a
Partial Cement Replacement and Its Influence on Concrete
Compressive Strength and Density Under Extended Curing
Conditions

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-mi66>

Received	2026/09/13	تم استلام الورقة العلمية في
Accepted	2026/09/29	تم قبول الورقة العلمية في
Published	2026/09/30	تم نشر الورقة العلمية في

Evaluating the Pozzolanic Efficacy of Waste Ceramic Powder as a Partial Cement Replacement and Its Influence on Concrete Compressive Strength and Density Under Extended Curing Conditions

¹Mohamed Ahmed Alnoairi*, ²Ali Mohammed Alajail,
³Abdalla Mari Mami, ⁴Malik Abdul Hakim Abu Zayyan,
⁵Hasan Mohamed Alkhanfas

University of Misurata, Misurata, Libya

*m.annairy@eng.misuratau.edu.ly

ORCID: 0009-0007-3264-3720

Abstract

This study investigates the pozzolanic efficacy of waste ceramic powder as a partial binder substitute in Portland cement concrete, evaluated at mass replacement levels of 0%, 5%, 10%, and 20%. The primary objective is to advance sustainable concrete technology while mitigating the environmental footprint associated with clinker production and industrial solid waste disposal. The experimental program involved casting cubic specimens subjected to an extended curing regime consisting of 28 days of water immersion followed by 28 days of laboratory air curing. Compressive strength and dry density parameters were systematically determined at 58 days. The mechanical evaluation demonstrated resilient structural behavior; while the control mixture attained a peak compressive strength of 56.67 MPa, the ceramic-incorporated mixtures retained high performance levels, yielding 54.17 MPa at 5% and 53.30 MPa at 20% replacement—representing a marginal strength loss capped at 5.9%. Furthermore, dry density values exhibited consistent structural stability across all substitution ratios. These findings are attributed to the delayed pozzolanic reactivity of fine ceramic particulates, which react with hydration-derived calcium hydroxide

Evaluating the Pozzolanic Efficacy of Waste Ceramic Powder as a
Partial Cement Replacement and Its Influence on Concrete
Compressive Strength and Density Under Extended Curing
Conditions

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-mi66>

to form supplementary calcium silicate hydrate (C-S-H) gels. Overall, the results confirm that incorporating up to 20% waste ceramic powder offers a viable, eco-friendly cementitious alternative without compromising structural integrity.

Keywords: Waste Ceramic Powder, Pozzolanic Efficacy, Sustainable Concrete, Compressive Strength, Extended Curing.

تقييم الفاعلية البوزولانية لمسحوق مخلفات السيراميك كبديل جزئي
للإسمنت وأثرها على الخواص الميكانيكية والكثافة للخرسانة تحت ظروف
المعالجة الممتدة

*محمد أحمد النعيري¹ علي محمد العجيل² عبدالله مرعي مامي³ مالك عبد الحكيم أبوزيان⁴

حسن محمد الخنفاس⁵

كلية الهندسة - جامعة مصراتة ، ليبيا

*m.annairy@eng.misuratau.edu.ly

الملخص

تسعى هذه الدراسة إلى تقييم الفاعلية البوزولانية لمسحوق مخلفات السيراميك واستكشاف إمكانية استخدامه كبديل جزئي للإسمنت البورتلاندي بنسب استبدال وزنية بلغت (0%، 5%، 10%، 20%)، بهدف تطوير خرسانة مستدامة وتقليل الأثر البيئي الناتج عن إنتاج الإسمنت وتراكم المخلفات الصلبة. اشتملت المنهجية التجريبية على تجهيز عينات خرسانية مكعبة واختبارها تحت ظروف معالجة ممتدة شملت 28 يوماً من المعالجة المائية الرطبة تلتها 28 يوماً من التصلد والتعريض للهواء الجاف. تم قياس قيم مقاومة الضغط والكثافة الجافة لجميع الخلطات بعمر 58 يوماً. أظهرت النتائج أداءً ميكانيكياً متماسكاً؛ حيث سجلت الخلطة المرجعية مقاومة ضغط بلغت 56.67Mpa، في حين حافظت الخلطات الحاوية على مسحوق السيراميك على مستويات مقاومة مرتفعة قاربت 54.17Mpa عند نسبة 5% 53.30Mpa عند نسبة 20%، بنسبة انخفاض طفيفة لم تتجاوز 5.9%. كما أظهرت الكثافة الجافة استقراراً ملحوظاً عبر مختلف النسب. تُعزى هذه النتائج إلى النشاط البوزولاني المتأخر لمسحوق السيراميك وتفاعله مع هيدروكسيد

Evaluating the Pozzolan Efficacy of Waste Ceramic Powder as a
Partial Cement Replacement and Its Influence on Concrete
Compressive Strength and Density Under Extended Curing
Conditions

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-mi66>

الكالسيوم لتشكيل هيدرات سيليكات الكالسيوم الإضافية (C-S-H)، مما يؤكد نجاح استخدام مسحوق السيراميك حتى نسبة 20% كبديل بيئي واعد للإسمنت دون الإخلال الجوهري بالكفاءة الإنشائية. الكلمات المفتاحية: مسحوق مخلفات السيراميك، الفاعلية البوزولانية، خرسانة مستدامة، مقاومة الضغط، المعالجة الممتدة.

1. المقدمة:

تُعد صناعة الخرسانة من أكثر الصناعات استهلاكاً للموارد الطبيعية وتأثيراً على البيئة، حيث يتسبب إنتاج الإسمنت البورتلاندي وحده في إطلاق ما يقارب 8% من إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (CO_2) عالمياً [1]. ولتحقيق التنمية المستدامة وتقليل البصمة الكربونية للمنشآت، اتجهت البحوث الحديثة نحو استبدال الإسمنت جزئياً بمواد بوزولانية ثانوية أو مخلفات صناعية [2]. وفي هذا السياق، تشكل مخلفات السيراميك الناتجة عن عمليات التصنيع والتركيب والهدم عبئاً بيئياً كبيراً نظراً لعدم قابلية السيراميك للتحلل البيولوجي وتراكمه في المكبات [3].

تمتلك بودة السيراميك الدقيقة خواصاً بوزولانية واعدة نظراً لاحتوائها على نسب عالية من السيلكا والألومينا النشطة الناتجة عن المعالجة الحرارية المرتفعة أثناء التصنيع [4]. وتؤكد الأدبيات البحثية أن إضافة مسحوق السيراميك كبديل جزئي للإسمنت تسهم في تفاعل هذه السيلكا مع هيدروكسيد الكالسيوم $Ca(OH)_2$ - الناتج من إمالة الإسمنت - لتكوين سيليكات الكالسيوم الهيدراتية C-S-H الإضافية، مما يعزز البنية المجهرية للخرسانة ويقلل المسامية [5].

وقد أجرى العديد من الباحثين دراسات حول كفاءة مسحوق السيراميك؛ حيث أوضح Steiner وآخرون [6] أن استبدال الإسمنت بمسحوق السيراميك أدى إلى تحسين المقاومة الميكانيكية ومتانة الخرسانة عند أعمار التصلد المتقدمة. كما أشار El-Dieb وآخرون [7] إلى أن الحجم الحبيبي لمسحوق السيراميك يلعب دوراً جوهرياً في زيادة

Evaluating the Pozzolanic Efficacy of Waste Ceramic Powder as a
Partial Cement Replacement and Its Influence on Concrete
Compressive Strength and Density Under Extended Curing
Conditions

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-mi66>

النشاط البوزولاني. وفي دراسة قام بها Kannan وآخرون [8]، لوحظ أن المساهمة الفعلية للتفاعل البوزولاني لمسحوق السيراميك تبرز بشكل واضح في الأعمار المتأخرة، حيث تتطلب هذه التفاعلات مدى زمنياً أطول مقارنة بتفاعلات الإماهة الأساسية للإسمنت.

ورغم وجود أبحاث تناولت استخدام السيراميك كبديل للإسمنت، إلا أن تقييم الفاعلية البوزولانية تحت ظروف المعالجة الممتدة والتي تشمل المعالجة الرطبة لمدة 28 يوماً متبوعة بفترة تصلّد وهواء جاف لمدة 28 يوماً أخرى - ما يزال بحاجة إلى مزيد من الاستكشاف. يهدف هذا البحث إلى التقييم التجريبي للفاعلية البوزولانية لمسحوق مخلفات السيراميك عند استبداله جزئياً بنسب (0%، 5%، 10%، 15%، 20%) من وزن الإسمنت، وتحليل أثره المباشر على الخواص الميكانيكية (مقاومة الضغط) والفيزيائية (الكثافة الجافة) للخرسانة.

2. منهجية الدراسة:

تتمثل المنهجية المتبعة في هذه الدراسة في إجراء تجارب عملية على عدد (24) عينة من مكعبات خرسانية بمقاس 10سم × 10سم × 10سم. قسمت على ثلاث نسب استبدال بالإضافة إلى الخلطة المرجعية (بدون استبدال)، حيث تم تجهيز العينات في معمل كلية الهندسة جامعة مصراتة باستخدام الخلطة المعملية. تم فك العينات في اليوم التالي للصب ووضعها في أحواض المعالجة الرطبة عند درجة حرارة الغرفة ذات لمدة (28) يوم.

جهزت العينات من اسمنت الاتحاد العربي للمقاولات العامة كما موضح في الشكل (1) ورمل ناعم من أحد محاجر منطقة زريق بأطراف المدينة وركام خشن من إحدى الكسارات العاملة في جنوب مدينة مصراتة.

Evaluating the Pozzolanic Efficacy of Waste Ceramic Powder as a
Partial Cement Replacement and Its Influence on Concrete
Compressive Strength and Density Under Extended Curing
Conditions

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-mi66>



شكل 1: الاسمنت المستخدم في تجهيز العينات

هذه الدراسة أجريت على خرسانة منتجة من اسمنت شركة الاتحاد العربي للمقاولات العامة ومن ركام خواصه موضحة في الجدول (1)

جدول 1 : نتائج اختبار تحديد الوزن النوعي ونسبة الامتصاص للركام الخشن

	العينة (1)	العينة (2)	
WT .IN AIR SATURATED SURFACE DRY. (A) g	1029.1	1032.5	
WT .IN AIR OF OVEN DRY SAMPLE, (B) g	1017.8	1021.2	
WT .OF SAMPLE IN WATER. (C) g	642.9	645.5	Average
BULK SP Gr. B/(A-C)	2.635	2.639	2.637
BULK SP Gr. A/(A-C) (S.S.D.)	2.665	2.668	2.666
APPARENT SP.Gr -B/(B-C)	2.715	2.718	2.716
ABSORPTION PERCENT (A-B/B)*100	1.11	1.11	1.11

كما يبين الجدول 2 نتيجة اختبار تعيين معامل الصدم للركام الخشن والذي أجري وفقا للمواصفة (BS 812-Part 112: 1990).

Evaluating the Pozzolanic Efficacy of Waste Ceramic Powder as a
Partial Cement Replacement and Its Influence on Concrete
Compressive Strength and Density Under Extended Curing
Conditions

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-mi66>

جدول 2: نتائج اختبار تعيين معامل الصدم للركام الخشن

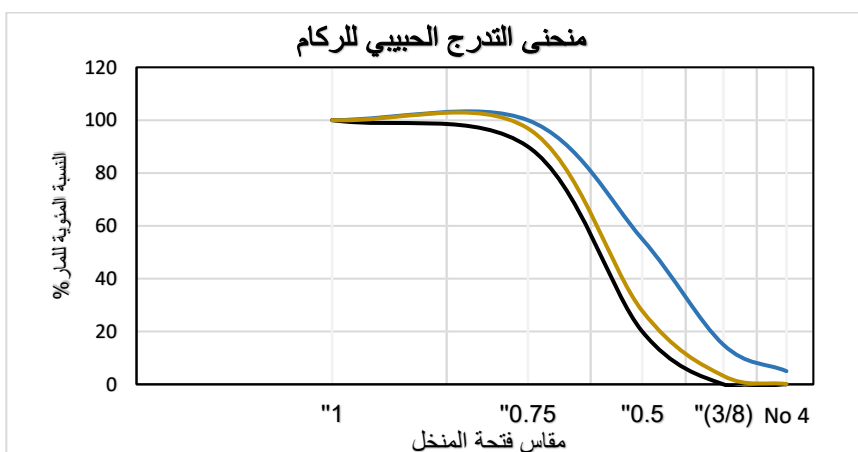
Test sample	Mass of dry sample A(g)	Mass Passing Sieve (2.36 mm) B(g)	Impact value $100 \times B/A(\%)$
	636.4	52.2	8.2
	639.6	51.5	8.1
Average			8.1

كما يبين الجدول 3 نتيجة اختبار التدرج الحبيبي للركام والذي أجري وفقا للمواصفة
ASTM Designation C136-01

جدول 3: يبين نتيجة نتائج التحليل المنخلي للركام المستخدم في الخلط

Sieve	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No4	Pan
Retained (g)	0	230	5058	1803	231.0	7
Retained %	0	3.1	69	24.6	3.2	1
Passing %	100	96.9	27.8	3.2	0.1	0

كما يبين الشكل 2 تدرج عينة الركام المستخدم في الخلطات الخرسانية



Evaluating the Pozzolanic Efficacy of Waste Ceramic Powder as a
Partial Cement Replacement and Its Influence on Concrete
Compressive Strength and Density Under Extended Curing
Conditions

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-mi66>

كما يبين الجدول 4 كميات ومكونات الخلطة للمتر المكعب للمقاومات مجال الدراسة

جدول 4: كميات ومكونات الخلطة المرجعية المستهدفة (C35) للمتر المكعب

كمية الاسمنت (Kg/m ³)	كمية الركام (Kg/m ³)	كمية الرمل (Kg/m ³)	كمية ماء الخلط (Liter/m ³)
400	941	624	230



شكل 3 : يوضح تجهيز وطحن بقايا مخلفات السيراميك

والشكل 4 يبين عينة من نواتج طحن مخلفات السيراميك قبل النخل.



شكل 4 : يوضح نتيجة طحن مخلفات السيراميك قبل عملية نخلها على المنخل رقم 200

Evaluating the Pozzolanic Efficacy of Waste Ceramic Powder as a
Partial Cement Replacement and Its Influence on Concrete
Compressive Strength and Density Under Extended Curing
Conditions

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-mi66>

بينما الشكل 5 يوضح نخل عينة مخلفات السيراميك على المنخل رقم 200 للحصول على المواد الناعمة.



شكل 5 : نخل عينة بودرة السيراميك على المنخل رقم 200

في حين الشكل 6 يوضح عينة بودرة السيراميك المارة من المنخل 200



شكل 6 : عينة بودرة مخلفات السيراميك بعد النخل على المنخل 200

والشكل 7 يوضح عينة يتم وزنها على الميزان الحساس المستخدم في القياس

Evaluating the Pozzolanic Efficacy of Waste Ceramic Powder as a
Partial Cement Replacement and Its Influence on Concrete
Compressive Strength and Density Under Extended Curing
Conditions

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-mi66>



شكل 7 : وزن كمية الركام الخشن باستخدام الميزان الحساس

والأشكال 8 و 9 و 10 و 11 و 12 تبين مراحل الخلط الجاف للمواد قبل إضافة كمية الماء اللازمة للخلط وكذلك صب العينات في القوالب مع الدمك والتشطيب النهائي.



شكل 8 : خلط المكونات الأساسية للخلطة الخرسانية على الجاف



شكل 9 : تجهيز العينات الخرسانية وصبها في قوالب

Evaluating the Pozzolanic Efficacy of Waste Ceramic Powder as a
Partial Cement Replacement and Its Influence on Concrete
Compressive Strength and Density Under Extended Curing
Conditions

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-mi66>



شكل 10 : تسوية السطح النهائي للعينات



شكل 11 : وضع العلامات والبيانات على العينات الخرسانية

بينما الشكل 12 يبين العينات المدروسة أثناء فترة المعالجة الرطبة بالماء داخل المختبر .



شكل 12 : غمر العينات في أحواض المعالجة المائية لمدة 28 يوم

Evaluating the Pozzolanic Efficacy of Waste Ceramic Powder as a
Partial Cement Replacement and Its Influence on Concrete
Compressive Strength and Density Under Extended Curing
Conditions

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-mi66>

3. النتائج:

بعد الانتهاء من معالجة العينات من كل نسبة استبدال، حيث تم استخراج جميع العينات من أحواض المعالجة وتركها معرضة للجو لمدة 28 يوم إضافية، وبعد انقضاء هذه المدة نقلت العينات إلى معمل شركة المنتهى للإستشارات والأعمال الهندسية المعتمدة في مدينة مصراتة للقيام بتحديد مقاومة الضغط لكل نسبة.

وبعد إجراء الاختبار على جميع العينات حصلنا على مقاومة العينات مجال الدراسة والتي أدرجت في الجدول (5) قرين كل نسبة استبدال على حدة:

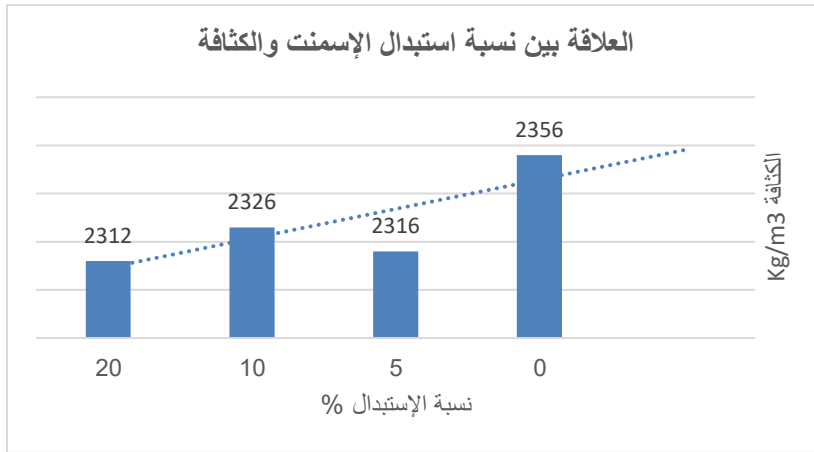
جدول 5. نتائج مقاومة الضغط للعينات

متوسط الكثافة بعمر 58 يوم (kg/m ³)	الكثافة بعمر 58 يوم (Kg/m ³)	متوسط المقاومة بعمر 58 يوم (Mpa)	المقاومة بعمر 58 يوم (Mpa)	نسبة الإستبدال (%)
2356	2345	56.67	58.9	%0
	2390		55.3	
	2334		55.8	
2316	2358	54.17	56.2	%5
	2329		53.5	
	2261		52.8	
2326	2293	53.53	50.9	%10
	2360		54.4	
	2325		55.3	
2312	2335	53.3	54.5	%20
	2293		53.7	
	2309		53.3	

Evaluating the Pozzolanic Efficacy of Waste Ceramic Powder as a
Partial Cement Replacement and Its Influence on Concrete
Compressive Strength and Density Under Extended Curing
Conditions

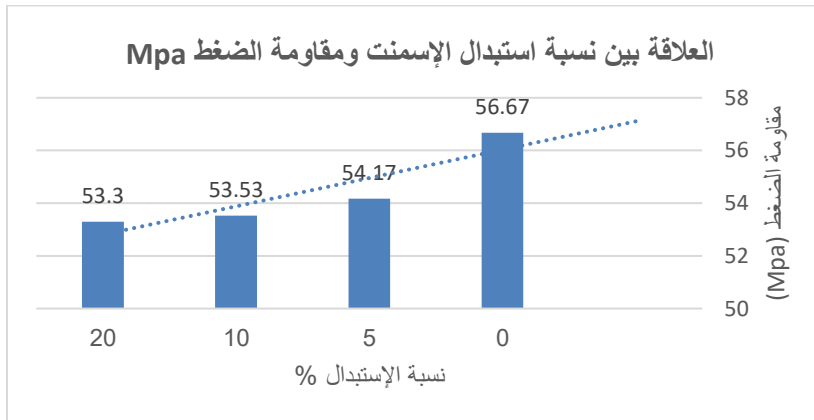
<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-mi66>

والشكل 13 يبين العلاقة بين كثافة العينات الخرسانية ونسبة استبدال الإسمنت ببودرة السيراميك.



شكل 13 العلاقة بين نسبة استبدال الإسمنت (%) والكثافة (kg/m^3)

والشكل 14 يوضح العلاقة بين نسبة استبدال الإسمنت ببودرة مخلفات السيراميك ومقاومة الضغط الناتجة.



شكل 14 العلاقة بين نسبة استبدال الإسمنت (%) ومقاومة الضغط (Mpa)

Evaluating the Pozzolan Efficacy of Waste Ceramic Powder as a
Partial Cement Replacement and Its Influence on Concrete
Compressive Strength and Density Under Extended Curing
Conditions

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-mi66>

4. المناقشة:

تُعد مرحلة المعالجة الممتدة (58 يوماً؛ مقسمة إلى 28 يوماً من المعالجة المائية الرطبة متبوعة بـ 30 يوماً من التصلد الجاف في الهواء) ركيزة أساسية لتقييم الفاعلية البوزولانية المتأخرة لمسحوق مخلفات السيراميك، والوقوف على مدى كفاءته كبديل جزئي للإسمنت البورتلاندي بنسب الاستبدال المدروسة (0%، 5%، 10%، 20%).

حيث سجلت الخلطة المرجعية (0% مسحوق سيراميك) القيمة المعيارية الأعلى لمقاومة الضغط بمتوسط قدره 56.67 MPa. ومع التدرج في إدخال مسحوق السيراميك كبديل جزئي، أظهرت الخرسانة استجابة ميكانيكية متقاربة ومستقرة؛ حيث بلغت قيم المقاومة 54.17 MPa عند نسبة استبدال 5%، و 53.53 MPa عند نسبة 10%، و 53.30 MPa عند النسبة الأعلى 20%.

للتحقق من مدى دقة وقبول هذه النتائج مخبرياً، تم إخضاع قراءات مقاومة الضغط للعينات الثلاث من كل خلطة للتحليل الإحصائي. باستخدام حسابات التباين والانحراف المعياري لتقدير معامل الاختلاف (C.V)، تبين أن قيم C.V لجميع الخلطات قد انحصرت في نطاق ضيق يتراوح بين 3.3% و 4.5%، وحيث أن المواصفات القياسية لاختبارات الخرسانة المعملية تعتبر النتائج ذات موثوقية وتجانس عاليين إذا قل معامل الاختلاف عن 10%، وبالتالي فإن هذا النتائج تعطي القبول الهندسي والأكاديمي التام للنتائج المتحصل عليها.

ومن المنظور التحليلي، يمثل هذا التدرج انخفاضاً طفيفاً ومحدوداً في المقاومة لم يتجاوز 5.9% عند أقصى نسبة استبدال (20%). وبالتالي فإن عدم تراجع المقاومة بنسبة موازية لحجم الإسمنت المستبدل لا يعكس مجرد أثر التخفيف فقط، بل يبرهن بوضوح على نشاط بوزولاني تعويضي جدير بالإهتمام.

يتطابق هذا السلوك الهيكلي مع استنتاجات الدراسة التي قام بها Steiner وآخرين [6]، والتي أكدت أن النعومة الفائقة لبودرة السيراميك والسيلكا النشطة المحفزة حرارياً أثناء تصنيع السيراميك تُكسب المادة الرابطة الإسمنتية قدرة تفاعلية في الأعمار المتقدمة. كما

Evaluating the Pozzolan Efficacy of Waste Ceramic Powder as a
Partial Cement Replacement and Its Influence on Concrete
Compressive Strength and Density Under Extended Curing
Conditions

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-mi66>

يُفسر نمط المعالجة الممتدة نجاح هذه الآلية، وهو ما ينسجم مع الطرح البحثي لكل من Kannan وآخرين [8]؛ حيث يتطلب التفاعل البوزولاني لمسحوق السيراميك فترة زمنية لتستهلك السيلكا النشطة هيدروكسيد الكالسيوم Ca(OH)_2 الناتج عن إماهة الإسمنت وتحويله إلى جل سيليكات الكالسيوم الإضافية (C-S-H). إن هذا التحول يعزز المنطقة الانتقالية المتداخلة (ITZ)، وهو ما يتفق أيضاً مع الدراسة التي قام بها El-Dieb وآخرين [7] حول الدور الجوهرى للحجم الحبيبي الناعم في تحسين البنية المجهرية للخرسانة.

في حين كشفت النتائج عن استقرار ملحوظ في الكثافة الجافة بعمر 58 يوماً؛ حيث بلغت 2356 kg/m^3 للخلطة المرجعية، بينما تراوحت للخلطات الحاوية على السيراميك بين 2312 kg/m^3 و 2326 kg/m^3 . جميع القيم إحصائياً، لم يتجاوز التباين الكلي في الكثافة عبر جميع نسب الاستبدال بهامش 1.9% مقارنة بالخلطة المرجعية. يُعزى هذا الاستقرار الكتلي إلى الآلية المزودة المتمثلة في نواتج التفاعل البوزولاني وتأثير التعبئة الحبيبية (Micro-filling effect). حيث تعمل الدقائق الناعمة لبودرة السيراميك على إغلاق الفراغات البينية الدقيقة، مما يشكل مصفوفة خرسانية متضامنة تعوض الفارق الطفيف في الوزن النوعي بين جزيئات السيراميك والدقائق الإسمنتية المستبدلة، وتدعم الاستقرار الكتلي على المدى الطويل.

بالاستناد إلى المعطيات الإحصائية والتحليل الميكانيكي الدقيق، يمكن التأكيد على أن البحث قد حقق غايته المنشودة بامتياز عبر المسارين أولهما من ناحية الإستدامة ففي ظل تسبب صناعة الإسمنت البورتلاندي بما يقارب 8% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون عالمياً، أثبت البحث الجدوى العملية لاستبدال ما يصل إلى 20% من وزن الإسمنت بمخلفات السيراميك الصلبة، حيث يحقق هذا التوجه استراتيجية مزدوجة تتمثل في خفض البصمة الكربونية للخرسانة، وإيجاد حل ممتاز مستدام وآمن لإعادة تدوير مخلفات السيراميك غير القابلة للتحلل، وتخفيف العبء عن المكبات وأماكن تجمع المخلفات، وفي الوقت الذي برهنت فيه الدراسة أن خفض كمية الإسمنت بنسبة 20% واستبدالها بمسحوق السيراميك لم يُخل بالكفاءة الإنشائية، حيث ظلت الخرسانة محتقظة

Evaluating the Pozzolan Efficacy of Waste Ceramic Powder as a
Partial Cement Replacement and Its Influence on Concrete
Compressive Strength and Density Under Extended Curing
Conditions

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-mi66>

بمقاومة ضغط تقارب 53 Mpa مما يضع هذا الأداء الميكانيكي الخرسانة المنتجة ضمن تصنيف الخرسانات عالية المقاومة، مما يثبت ملاءمتها التامة للتطبيقات الإنشائية المتقدمة، ويؤكد أن تحقيق الاستدامة البيئية قد تم بنجاح دون المساس بالسلامة الهيكلية والكفاءة الميكانيكية للخرسانة، وعلى الصعيد الإنشائي برهن البحث مخبرياً وإحصائياً أن خفض كمية الإسمنت بنسبة 20% واستبدالها بمسحوق السيراميك لم يُخل بالكفاءة الإنشائية، حيث ظلت الخرسانة محتفظة بمقاومة ضغط تقارب 53 Mpa ، هذه النتائج تضع الأداء الميكانيكي للخرسانة المنتجة ضمن تصنيف الخرسانات عالية المقاومة، مما يثبت ملاءمتها التامة للتطبيقات الإنشائية المتقدمة، ويؤكد أن تحقيق الاستدامة البيئية قد تم بنجاح دون المساس بالسلامة الهيكلية والكفاءة الميكانيكية للخرسانة.

7. الخلاصة

تتوج هذه الدراسة مساراً بحثياً وتطبيقياً يهدف إلى تعزيز مفهوم الخرسانة المستدامة من خلال إعادة توظيف مخلفات السيراميك الصناعية واستغلال خواصها البوزولانية الكامنة للحد من الاعتماد الكلي على الإسمنت البورتلاندي. وقد أثبت التقييم التجريبي الشامل أن اعتماد مسحوق السيراميك الدقيق كبديل جزئي بنسب تصل إلى 20% يمثل حلاً هندسياً واعداً يحقق التوازن بين الحفاظ على الكفاءة الميكانيكية العالية للخرسانة تقارب 53 Mpa وحماية البيئة عبر خفض الانبعاثات الكربونية المصاحبة لإنتاج الإسمنت. وتتجلى القيمة العلمية المضافة لهذه الدراسة في إبراز أثر نمط المعالجة الممتد (الرطب والجاف) في تحفيز التفاعلات البوزولانية المتأخرة بين السيلكا النشطة وهيدروكسيد الكالسيوم، مما أدى إلى بناء مصفوفة خرسانية كثيفة ومحسنة البنية المجهرية تحاكي في خصائصها الخرسانة التقليدية. تُرسخ هذه النتائج نجاح تحويل المخلفات الصلبة غير القابلة للتحلل إلى مادة بوزولانية ثانوية ذات قيمة مضافة في قطاع الإنشاءات، وتفتح أفقاً واسعاً لمزيد من البحوث حول متانة وأداء هذه الخرسانة تحت الظروف البيئية والقاسية على المدى الطويل.

8. المراجع

- Evaluating the Pozzolan Efficacy of Waste Ceramic Powder as a Partial Cement Replacement and Its Influence on Concrete Compressive Strength and Density Under Extended Curing Conditions
- <http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-mi66>
-
- [1] R. M. Andrew, "Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018," *Earth System Science Data*, vol. 11, no. 4, pp. 1675–1710, 2019 .
 - [2] P. K. Mehta and P. J. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2014.
 - [3] J. de Brito, A. S. Silva, and J. Correia, "Recycling of ceramic waste in concrete production: A review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 86, pp. 126–137, 2015.
 - [4] J. A. Pacheco-Torgal and S. Jalali, "Compressive strength and durability properties of ceramic wastes based concrete," *Materials and Structures*, vol. 43, no. 5, pp. 601–614, 2010.
 - [5] Z. A. Medina, F. Agrela, and M. Sanchez, "Use of ceramic wastes as pozzolanic materials in cementitious matrices," *Construction and Building Materials*, vol. 125, pp. 780–790, 2016.
 - [6] H. Steiner, M. Rieder, and H. F. Taylor, "Pozzolan reactivity and microstructural development of ground waste ceramic powder in concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 115, pp. 30–42, 2019.
 - [7] A. S. El-Dieb, D. M. Taha, and M. A. Reda, "Use of recycled ceramic waste powder in concrete mixes," *Journal of Cleaner Production*, vol. 200, pp. 1100–1111, 2018.
 - [8] D. M. Kannan, H. S. Aboubakr, and A. M. El-Dieb, "Effect of ceramic dust size on mechanical and durability performance of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 154, pp. 872–881, 2017.