Wadi Alshatti University Journal of
Pure and Applied Sciences

مجلة جامعة وادي الشاطئ
للعلوم البحتة والتطبيقية

Volume 4, No. 2, July-December 2026 Online ISSN: 3006-0877 المجلد 4، الاصدار 2، يوليو- ديسمبر 2026

RESEARCH ARTICLE **CIVIL ENGINEERING**

Performance of Silica Fume Modified Concrete in Aggressive Environment

Dalia F. Awlad[1,*], Abdulkader Al-Joundi[2]

[1]Department of Transportation Engineering, Al-Wataniya Private University, Hama, Syria.
[2]Department of Transportation Engineering, Hama University, Hama, Syria.

ARTICLE HISTORY
Received 04 August 2026
Revised 11 September 2026
Accepted 19 September 2026
Online 23 September 2026

KEYWORDS
Silica Fume;
Chemical Resistance;
Sulfuric Acid;
Sulfate-Resisting Cement;
Compressive Strength;
Durability;
Sulphate Acid;
Replacement Silica Fume-cement.

ABSTRACT

Concrete structures in industrial and wastewater environments are often exposed to aggressive chemical attacks, particularly from sulfuric acid, which significantly degrades their mechanical properties and service life. This study investigates the effect of partially replacing Ordinary Portland Cement (OPC) with Silica Fume (SF) at ratios of 0%, 5%, 10%, and 15% on the mechanical and physical properties of cement mortar specimens exposed to a sulfuric acid solution (5 G/L). A total of 100 standard prismatic specimens (4*4*16 cm) were prepared, cured in both water (as a reference) and acid medium, and tested at ages of 7, 28, 56, and 90 days. Key performance indicators included mass change, flexural strength, and compressive strength. The results were Sulfate-Resisting Cement (SRC) under identical conditions. The findings revealed that the 10% SF replacement ratio exhibited the optimal performance, achieving the highest compressive strength (29.01MPa1.17%) and flexural strength (8.61 MPa) at 90 days in the acidic medium – an increase of 15% over the reference specimens – while demonstrating the lowest mass loss (-1.17%). Moreover, the OPC+10%SF mixture outperformed SRC in terms of weight stability and overall chemical resistance. Statistical analysis (ANOVA) confirmed significant differences between replacement ratios, with a coefficient of variation below 0.05, ensuring high experimental reliability. The study concludes that incorporating 10% silica fume into OPC effectively enhances the durability of concrete in sulfuric acid environments, offering a cost-effective and technically superior alternative to SRC for aggressive exposure conditions) and flexural strength (8.61 MPa) at 90 days in the acidic medium –an increase of 15% over the reference specimens- while demonstrating the lowest mass lose.

أداء الخرسانة المعدلة بالسيليكافيوم في البيئات العدوانية

داليا فرج أولاد [1]*، عبدالقادر الجندي[2]

الملخص

تعد إضافة هباب السيليس (silica fume) من الحلول الواعدة لتحسين أداء الخرسانة في البيئات العدوانية. يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير الاستبدال الجزئي للإسمنت البورتلاندي العادي (OPC) بنسب (0%، 5%، 10%، 15%) من السيليكافيوم على الخواص الميكانيكية والفيزيائية لعينات المونة الإسمنتية المعرضة لوسط حمض الكبريت بتركيز 5 G/L، ومقارنتها مع عينات من الاسمنت المقاوم للكبريتات (SRC). أنتج 100 موشور قياسي (4*4*16) Cm وتم حفظها في الماء (كمرجع) وفي الوسط الحمضي، واختبرت عند أعمار 7، 28، 56، 90 يوما. أظهرت النتائج أن النسبة المثلى للاستبدال هي 10%، حيث حققت أعلى مقاومة للضغط (29.01 MPa) ومقامة للشد بالانعطاف (8.61 MPa) في الوسط الحمضي عند عمر 90 يوما، بزيادة قدرها 15% عن العينات المرجعية، مع تغير أقل وزني (1.17%-). كما تفوق أداء الخرسانة OPC+10%SF على أداء الخرسانة SRC من حيث الثبات الوزني والمقاومة الكيميائية. توصي الدراسة باستخدام 10% سيليكافيوم في البيئات الكبريتية والحمضية لتحسين المتانة وتقليل نفاذية الخرسانة.

الكلمات المفتاحية

السيليكافيوم
المقاومة الكيميائية
حمض الكبريت
الإسمنت المقاوم للكبريتات
مقاومة الضغط
نسبة استبدال سيليكافيوم-إسمنت
المتانة.

المقدمة

أهمية الخرسانة وتحدياتها البيئية

تعد الخرسانة المادة الإنشائية الأكثر استخداماً في العالم، حيث يتجاوز إنشائها السنوي 10 مليارات طن، مما يجعلها ثاني أكثر مادة استهلاكاً بعد الماء [1]. تعود هذه الشعبية إلى تعدد مزاياها، بما في ذلك توفر موادها الأولية، وسهولة تشكيلها، وقوتها الميكانيكية، ومقاومتها للحريق، وانخفاض تكلفتها نسبياً مقارنة بالمواد الأخرى كالصلب والألمنيوم [2]. ومع ذلك، تتعرض الخرسانة في العديد من التطبيقات العملية إلى ظروف بيئية قاسية تؤدي إلى تدهور أدائها وانخفاض عمرها الافتراضي. من أخطر هذه الظروف الهجمات الكيميائية الناتجة عن وجود الكبريتات والأحماض في البيئة المحيطة، خاصة في المنشآت الصناعية، محطات معالجة مياه الصرف الصحي، الأساس تفس التربة الكبريتية، والمنشآت البحرية [4,3].

*Corresponding author
https://doi.org/10.63318/waujpasv4i2_48
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

آليات الهجوم الكيميائي على الخرسانة

يتكون الإسمنت البورتلاندي بشكل رئيسي من سيليكا ثلاثي الكالسيوم (C3S)، سيليكات ثنائي الكالسيوم (C2S)، ألومينات ثلاثي الكالسيوم (C3A)، وألومينوفيريت رباعي الكالسيوم (C4AF). عند إماهة هذه المركبات بالماء، تنتج بشكل رئيسي:

1. سيليكات الكالسيوم المائية (C-S-H): وهي المادة الرئيسية المسؤولة عن القوة والتماسك.

2. هيدروكسيد الكالسيوم (Ca(OH)2): وهو منتج ثانوي يشكل حوالي 20-25% من حجم العجينة المتصلبة، وهو المسؤول عن القلوية العالية للخرسانة PH (12.5-13.5) التي تحمي حديد التسليح من التآكل [5,1].

عند التعرض الخرسانة لأيونات الكبريتات (SO4-2) أو الأحماض مثل (H2SO4)، تحدث سلسلة من التفاعلات الكيميائية المدمرة:

تفاعل حمض الكبريتيك مع هيدروكسيد الكالسيوم (تكوين الجبس) [1]:

$$Ca(OH)2 + H2So4 \rightarrow CaSo4.2H2O \text{(الجبس)}$$

تفاعل الجبس مع ألومينات ثلاثي الكالسيوم (تكوين الإترنجيت) [1]:

$$3CaSo4.2H2O + C3A + 26H2O \rightarrow C3A.CaSo4.32H2O \text{(الإترنجيت)}$$

يؤدي تكون الإترنجيت إلى زيادة حجمية تصل إلى 227%، مما يسبب تشققاً داخلياً وتدميراً للبنية الخرسانية [6]. بالإضافة إلى ذلك، يقوم الحمض بتفكيك مركبات C-S-H الأساسية، مما يؤدي إلى فقدان التماسك والقوة الميكانيكية [1].

قيمة PH لوسط الحفظ الحمضي

في هذا البحث، تم حفظ العينات في وسط حمض الكبريت بتركيز 5 g/L، والذي تم قياس قيمة الأس الهيدروجيني (PH) له ووجد أنها تقريباً 1.2 (حمض قوي جداً). هذا التركيز يعادل تقريباً 0.05 mol/L من H2SO4. اختير هذا التركيز المرتفع لمحاكاة الظروف الصناعية القاسية (مثل مياه الصرف الصحي الحمضية أو المنشآت الكيماوية)، ولتسريع عملية التآكل بهدف دراسة فعالية السيليكافيوم في ظروف عدوانية متطرفة خلال فترة زمنية محدودة (90 يوماً). للمقارنة، فإن PH الماء المستخدم كوسط مرجعي كان متعادل تقريبا (7.0).

المواد البوزولانية ودورها في تحسين المقاومة الكيميائية

للتغلب على هذه المشكلات، لجأ الباحثون إلى استخدام المواد البوزولانية (Pozzolanic Materials)، وهي مواد سيليكية أو سيليكوألومينية، تتفاعل مع هيدروكسيد الكالسيوم في وجود الماء لتكوين مركبات ذات خواص إسمنتية [7]. يمكن كتابة التفاعل البوزولاني العام بالمعادلة [7]:

$$SiO2\text{(نشط)} + Ca(OH)2 + H2O \rightarrow C-S-H$$

يقلل هذا التفاعل من كمية Ca(OH)2 المتاحة للهجوم الحمضي، ويزيد من كمية C-S-H الرابط، مما يحسن الكثافة ويقلل النفاذية. من أهم هذه المواد وأكثرها فعالية هو السيليكافيوم (Silica Fume- SF) أو الميكروسيلكا.

السيليكافيوم(Silica Fume) الخصائص والآليات

هباب السيليس هو منتج ثانوي لصناعة السيليكون وخلائط الحديد وسيليكون في الأفران القوسية الكهربائية. يتكون بشكل رئيسي من ثنائي أكسيد السيليكون (SiO2) غير المتبلور بنسبة تتجاوز 85%، ويتميز بصغر حجم جزيئاته (أقل من 1 ميكرومتر، ومتوسط حجم 0.15 ميكرومتر)، ومساحة سطحية نوعية كبيرة جداً (130000 – 300000 cm2/g) [8].

للسيليكافيوم آلتي عمل رئيسيتين في تحسين خواص الخرسانة:

1. التأثير الفيزيائي (تأثير الملء – Filler Effect) [9]:

تعمل جزيئات السيليكافيوم النانوية على ملء الفراغات بين حبيبات الإسمنت، مما يزيد من كثافة العجينة ويقلل من المسامية الكلية، خاصة في المنطقة الانتقالية البينية (ITZ) بين العجينة والركام. هذا يؤدي إلى تقليل النفاذية وبالتالي إبطاء دخول الأيونات الضارة إلى داخل الخرسانة.

2. التأثير الكيميائي (التفاعل البوزولاني) [7] :

يتفاعل SiO2 النشط الموجود في السيليكافيوم مع Ca(OH)2 المتكون أثناء إماهة الإسمنت، ليكون C-S-H إضافي. هذه العملية لها ثلاث آثار إيجابية رئيسية:

- تزيد من كمية المادة الرابطة، مما يحسن القوة الميكانيكية.
- تستهلك $Ca(OH)_2$، مما يقلل من مصدر القلوية التي تهاجم بالحمض.
- تقلل تدريجياً من PH الخرسانة (من 12.5-13.5 إلى 11-12.5) كما هو موضح في الجدول (1)، مما يقلل من قابلية التفاعل مع الأحماض مع الحفاظ على مستوى كافٍ لحماية حديد التسليح [3].

الجدول 1: التأثير التقريبي للسيليكافيوم على مستوى PH الخرسانة مع مرور الوقت [10,4,3]

نسبة السيليكافيوم%	PH عند 28 يوم بدون سيليكافيوم	PH عند 28 يوم مع سيليكافيوم	PH عند 56 يوم بدون سيليكافيوم
%0	13.5-12.5	-	-
%10-%5	-	12.5-11.5	12-11
%15-%10	-	12-11	11.5-10.5

السيليكافيوم والإسمنت المقاوم للكبريتات (SRC)

بالتوازي مع استخدام الإضافات، تم تطوير أنواع خاصة من الإسمنت لمقاومة الكبريتات، مثل الإسمنت المقاوم للكبريتات (Sulfate Resisting Cement-SRC)، والذي يتميز بانخفاض محتوى ألومينات ثلاثي الكالسيوم (C_3A) إلى أقل من 5%، لتقليل تكوين الإترنجيت [11]. ومع ذلك، فإن إنتاج SRC مكلف ومعقد، ولا يوفر بالضرورة حماية كاملة ضد الهجمات الحمضية، خاصة في البيئات ذات التركيزات العالية من الأحماض. لذلك، يهدف هذا البحث إلى مقارنة أداء الخرسانة المعدلة بالسيليكافيوم (بنسب مختلفة) مع خرسانة SRC في وسط حمض الكبريت، لتحديد النسبة المثلى من السيليكافيوم التي يمكنها تقديم أداء مماثل أو أفضل بتكلفة أقل وباستخدام تقنية أبسط (الخلط المباشر للإضافات مع الإسمنت البورتلاندي العادي).

الدراسة المرجعية

استناداً إلى المراجع العلمية المتوفرة، تم تحديد عدد من الدراسات السابقة التي تناولت موضوع السيليكافيوم ومقاومة الخرسانة للهجمات الكيميائية، ويمكن تلخيص أهمها كما يلي:

دراسات حول السيليكافيوم وتحسين الخواص الميكانيكية

أشارت الدراسة [7] إلى أن إضافة السيليكافيوم بنسبة تتراوح بين 5-15% تؤدي إلى تحسن ملحوظ في مقاومة الضغط للخرسانة، خاصة في الأعمار المتأخرة (بعد 28 يوماً)، وذلك بسبب استمرار التفاعل البوزولاني الذي يزيد من كمية C-S-H. كما أكدت الدراسة [9] أن تأثير الملء (Felling Effect)

للسيليكافيوم يساهم في تقليل المسامية الكلية للخرسانة بنسبة تصل إلى 30%، مما ينعكس إيجاباً على المتانة.

دراسات حول مقاومة الخرسانة للهجوم الحمضي والكبريتي

أظهرت الدراسة [3] أن خرسانة السيليكافيوم أبدت مقاومة أعلى لهجوم حمض الكبريت مقارنة بالخرسانة العادية، ويعزى ذلك إلى انخفاض نفاذية الخرسانة واستهلاك هيدروكسيد الكالسيوم الحر. كما وجدت الدراسة [10] أن استخدام السيليكافيوم بنسبة 10% أدى إلى انخفاض تآكل الخرسانة في أوساط الكبريتات بنسبة 40% مقارنة بالخرسانة المرجعية. من جهة أخرى، أشارت الدراسة [4] إلى أن دورات التبليل والتجفيف تزيد من شدة الهجوم الحمضي، وأن السيليكافيوم يقلل كم هذا التأثير بفضل تحسين البنية الدقيقة.

دراسات حول الإسمنت المقاوم للكبريتات (SRC)

أوضحت الدراسة [11] أن إسمنت SRC يتميز بانخفاض محتوى C_3A، مما يقلل من تكون الإترنجيت، لكنه قد لا يوفر حماية كافية ضد الأحماض العضوية وغير العضوية. كما أشارت الدراسة [2] إلى أن SRC أكثر تكلفة من الإسمنت البورتلاندي العادي، وأن استخدام الإضافات مثل السيليكافيوم يمكن أن يكون بديلاً اقتصادياً فعالاً.

الدراسات المحلية السورية والليبية

أشار التقرير الصادر عن وزارة الري السورية [12] إلى أن تركيز الكبريتات في بعض المناطق الصناعية والمائية في سوريا قد يصل إلى مستويات عالية تتطلب استخدام خرسانة مقاومة. كما أكد الكود العربي السوري للخرسانة المسلحة [13] على أهمية استخدام الإضافات المحسنة في البيئات العدوانية، لكنه لم يحدد نسب استبدال محددة، مما يدعو إلى إجراء أبحاث محلية لتحديد هذه النسب وفقاً للظروف البيئية السورية. . كما تناولت الدراسة [14] تأثير البوزولانا الطبيعية في زيادة مقاومة البيتون في الأوساط المخربة (حمض الآزوت)، وأظهرت تحسناً ملحوظاً في مقاومة الضغط والشد عند نسب استبدال محددة. هذه الدراسات الليبية تدعم فكرة استخدام المواد البوزولانية المحلية في تحسين متانة الخرسانة في البيئات العدوانية.

وفي السياق نُشرت العديد من الدراسات في ليبيا [22-15] ، حيث تناولت الدراسات [16,15] إلى تقييم دورة حياة انبعاثات الكربون والبصمة الكربونية لصناعة الإسمنت في ليبيا، مما يعكس الاهتمام المتزايد بالاستدامة البيئية في قطاع البناء، ويدعم فكرة استخدام الإضافات البوزولانية (مثل السيليكافيوم) كبديل جزئي عن الإسمنت لتقليل البصمة الكربونية. كما درست الدراسة [20] تأثير نسب الخلط باستخدام البوزولانا المحلية كبديل جزئي عن الإسمنت على التشقق اللدن في المونة الإسمنتية، وأظهرت أن نسب استبدال معينة يمكن أن تقلل من التشقق وتحسن الأداء. وناقشت الدراسة [21] مقامة الملاط الجيوبوليميري (المصنوع من بوزولانا محلية من جنوب ليبيا) لهجوم كبريتات الصوديوم، وأظهرت تفوقاً واضحاً للملاط الجيوبوليميري على الإسمنت البورتلاندي العادي في مقاومة الكبريتات. كما تناولت الدراسة [22] تأثير زمن حرق البوزولانا الجنوبية الليبية على خواص الخرسانة، وأظهرت تحسناً ملحوظاً في المقاومة عند ظروف حرق محددة.

خامساً: دراسات حول تقييم دورة حياة الكربون في صناعة الإسمنت

الفجوة البحثية التي يسدها هذا العمل

من خلال مراجعة الدراسات السابقة، تبين ان معظمها:

- ركز على مقاومة الكبريتات بتركيزات منخفضة، ولم يتناول تركيزات عالية من حمض الكبريت (مثل 5 g/L) المستخدمة في هذه الدراسة.
- قلة الدراسات التي قارنت مباشرة بين أداء خرسانة OPC+SF وخرسانة SRC في نفس الظروف.
- عدم تناول معظم الدراسات للتغير الوزني كمتغير رئيسي يعكس مدى التآكل والتشرب.
- ندرة الدراسات المحلية السورية والليبية في هذا المجال، مما يجعل هذا البحث إضافة مهمة للمكتبة الهندسية في المنطقة العربية.

لذلك يأتي هذا البحث ليسد هذه الفجوة من خلال دراسة متكاملة تجمع بين الخواص الميكانيكية (الضغط والشد) والفيزيائية (التغير الوزني)، مع مقارنة مباشرة مع SRC، واستخدام تركيز مرتفع من حمض الكبريت لمحاكاة الظروف الصناعية القاسية.

المواد وطرق العمل

المواد المستخدمة

تم استخدام المواد التالية في هذا البحث، وفقاً للمواصفات القياسية السورية والدولية:

أولاً: الإسمنت

الإسمنت البورتلاندي العادي (OPC): وفق المواصفات السورية 1980/44.

الإسمنت المقاوم للكبريتات (SRC): وفق للمواصفات السورية 121.

الجدول 2: الخصائص المميزة لنوعي الإسمنت المستخدمين

الخاصية	OPC	SRC
الوزن النوعي	3.1	3.1
السطح النوعي Cm^2/gr	3150	3100
ثبات الحجم وفق لوشاتولييه mm	2.0	2.0
زمن الشك الابتدائي min	130	145
زمن الشك النهائي min	220	245
مقاومة الضغط بعمر MPa 7 days	22.7	24.7
مقاومة الضغط بعمر Mpa 28 days	39.0	39.8
مقاومة الشد بعمر MPa days7	5.4	6.2
مقاومة الشد بعمر Mpa days 28	7.2	8.4

ثانياً: هباب السيليس (Silica Fume)

تم استخدام هباب سيليس تجاري مطابق للمواصفة ASTM C1240 [20].

التحليل الكيميائي موضح في الجدول (3).

الجدول 3: التحليل الكيميائي للمواد المستخدمة

الأوكسيد	Silica Fume	OPC	SRC
SiO_2	92.84	20.78	20.5
Al_2O_3	2.29	5.1	5.8
Fe_2O_3	2.61	4.13	3.4
CaO	1.1	64.1	62.7
CaO-f	-	1.68	0.9
MgO	0.3	2.1	1.7
SO_3	0.32	0.15	2.1
Na_2O	0.05	0.5	0.52
K_2O	0.12	0.27	0.24
Cl^-	0.1	0.04	0.01
LOI	0.2	1.0	0.7

ثالثاً: الرمل

رمل طبيعي قرواني نقي، تم إجراء اختبار المكافئ الرملي (Sand Equivalent Test) عليه، وبلغت النسبة الوسطية 80.8%، مما يشير إلى نقاوته وصلاحيته للاستخدام في إنتاج خرسانة عالية المقاومة.

رابعاً: الماء

ماء نقي للخلط، وماء الصنبور للحفظ.

- حمض الكبريت (H_2SO_4) بتركيز 5 g/L (تم تحضيره بإضافة 5g من الحمض المركز لكل لتر من الماء المقطر وبلغت قيمة PH للمحلول تقريباً 1.2.

تحضير العينات

تم صب 160 موشوراً قياسياً من المونة الإسمنتية بأبعاد (4*4*16 CM) وفقاً للمواصفة NFP15-403.

نسبة الخلط (إسمنت: ماء: رمل) = 1: 0.5: 3 (نسبة ماء/إسمنت = 0.50).

- نسب استبدال السيليكافيوم عن الإسمنت:
  - 0% (عينات مرجعية)
  - 5%
  - 10%
  - 15%
- تم حفظ العينات في وسطين:
  - الوسط المرجعي: ماء الصنبور (PH≈7.0).
  - الوسط المخرب: حمض الكبريت بتركيز 5 g/L (PH≈1.2).
- تم اختبار العينات عند أعمار: 7،28،56،90 يوماً.
- تم قياس المتغيرات التالية:
  - التغير الوزني (كنسبة مئوية من الوزن الأولي).
  - مقاومة الشد بالانعطاف (باستخدام جهاز الشد).
  - مقاومة الضغط (باستخدام جهاز الضغط، مع أخذ متوسط قراءتين لكل موشور).

الجدول 4: توزيع العينات المنتجة لإنجاز البحث

نوع الإسمنت	عمر العينة days	نسبة الإضافة %	وسط الحفظ ماء	عدد العينات	وسط الحفظ (حمض)	عدد العينات
OPC	7,28, 56,90	0%	H2O	4	H_2SO_4	4
OPC	,7,28 56,90	5%	H2O	4	H_2SO_4	4
OPC	,7,28 56,90	10%	H2O	4	H_2SO_4	4
OPC	,7,28 56,90	15%	H2O	4	H_2SO_4	4
SRC	,7,28 56,90	0%	H2O	4	H_2SO_4	4
المجموع الكلي				80		80

ملاحظة: تم توزيع العينات بحيث يكون لكل نسبة واستبدال ووسط حفظ 4 عينات لكل عمر، ليصبح المجموع الكلي 160 عينة. تم اختيار 4 عينات لكل متغير نظراً للقيود العملية والزمنية، مع التأكد من أن التحليل الإحصائي (NOVA) أظهر معامل تباين (CV) أقل من 0.05، مما يؤكد دقة النتائج وموثوقيتها. "يوصى باستخدام عدد فدي من العينات 5 أو 7 في الدراسات المستقبلية لزيادة الدقة".

النتائج والمناقشة

تأثير السيليكافيوم في الوسط المرجعي (الماء)

مناقشة النتائج في الوسط المرجعي (الماء)

أولاً: التغير الوزني

أظهرت النتائج أن جميع العينات المحفوظة في الماء أبدت زيادة وزنية طفيفة (تتراوح بين 0.1% و0.9%) خلال فترة الاختبار (90 يوماً). كانت أقل زيادة وزنية للعينات المحتوية على SF 5% (0.85% عند 90 يوماً)، بينما كانت أعلى زيادة للعينات المرجعية (0.87% عند 90 يوماً)، كما يبين الشكل (1). يمكن إرجاع هذه الزيادة إلى استمرار تفاعل الإماهة وامتصاص الماء من الوسط المحيط [1]. تشير هذه النتائج إلى أن إضافة السيليكافيوم حسنت من كثافة العجينة وقللت من المسامية، مما أدى إلى تقليل امتصاص الماء [9].

ثانياً: مقاومة الشد بالانعطاف

أظهرت العينات المحتوية على 15% SF أعلى مقاومة شد بالانعطاف عند

الجدول 5: القياسات الفيزيائية والميكانيكية لعينات OPC في الماء (الوسط المرجعي PH≈7.0)

نسبة SF %	days	تغير الوزن %	مقاومة الشد MPa	مقاومة الضغط MPa
%0	7	0.18	6.5	26.9
%0	28	0.54	7.43	30.25
%0	56	0.87	8.12	33.61
%0	90	0.85	8.12	33.09
%5	7	0.14	5.42	25.52
%5	28	0.88	8.62	32.13
%5	56	0.85	8.59	33.22
%5	90	0.85	8.54	34.8
%10	7	0.13	6.97	24.42
%10	28	0.87	8.76	31.37
%10	56	0.82	8.19	32.95
%10	90	0.81	7.77	33.93
%15	7	0.10	6.61	24.04
%15	28	0.84	8.68	31.1
%15	56	0.81	8.69	32.89
%15	90	0.83	8.78	34.00

(جميع القيم هي متوسط 4 عينات لكل متغير)

الجدول 6: القياسات الفيزيائية والكيميائية لعينات OPC في حمض الكبريت (PH≈1.2 ,5 g/L).

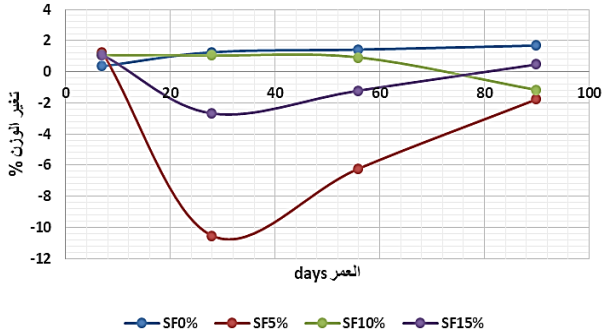
نسبة SF (%)	عمر العينة (يوم)	تغير الوزن (%)	مقاومة الشد (MPa)	مقاومة الضغط (MPa)
0%	7	0.35	5.13	15.47
0%	28	1.25	6.46	21.13
0%	56	1.42	7.14	21.45
0%	90	1.68	7.47	25.03
5%	7	1.24	6.56	19.62
5%	28	-10.54	7.95	27.44
5%	56	-6.22	8.21	29.08
5%	90	-1.77	8.56	30.60
10%	7	1.07	6.91	18.19
10%	28	1.04	8.80	26.17
10%	56	0.92	8.72	29.00
10%	90	-1.17	8.61	29.01
15%	7	1.09	6.91	18.59
15%	28	-2.68	7.47	25.35
15%	56	-1.21	7.41	28.77
15%	90	+0.47	7.51	28.65

مناقشة النتائج في وسط حمض الكبريت

أولاً: التغير الوزني

في الوسط الحمضي (PH≈1.2)، لاحظنا سلوكاً مختلفاً تماماً الشكل (4):

- العينات المرجعية (SF 0%): أبدت زيادة وزنية مستمرة (+1.68% عند 90 يوماً)، نتيجة لامتصاص الحمض والماء وتكون مركبات جديدة مثل الجبس داخل المسام [3].
- العينات بـ5% SF: أظهرت فقداناً وزنياً ملحوظاً (-1.77% عند 90 يوماً)، مما يشير على تآكل سطحي وفقدان للمادة نتيجة الهجوم الحمضي.
- العينات بـ10% SF: سجلت أقل فقدان وزني (-1.17% عند 90 يوماً)، مما يؤكد ان هذه النسبة وفرت أفضل حماية ضد التآكل والتشرب.
- العينات بـ15% SF: أظهرت زيادة وزنية طفيفة (+0.47% عند 90 يوماً)، مما يشير إلى أن النسبة العالية قد تزيد من المسامية الشعرية أو التشرب رغم تحسين الكثافة.

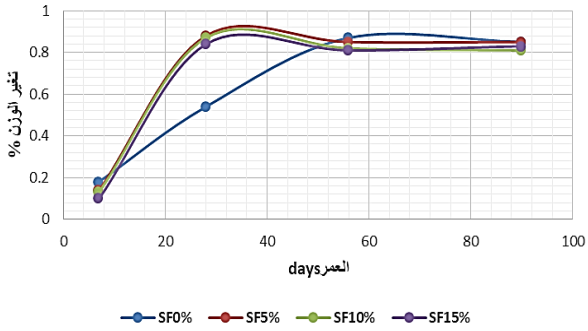


الشكل 4: تغير وزن عينات الـ OPC مع تغير نسبة SF وعمر العينات في الوسط الحمضي.

هذه النتائج تؤكد أن نسبة 10% هي الأفضل لتحقيق توازن بين الكثافة والمقاومة الكيميائية، حيث إنها تقلل النفاذية بشكل كافٍ لتمنع تشرب الحمض، مع الحفاظ على تماسك البنية [10].

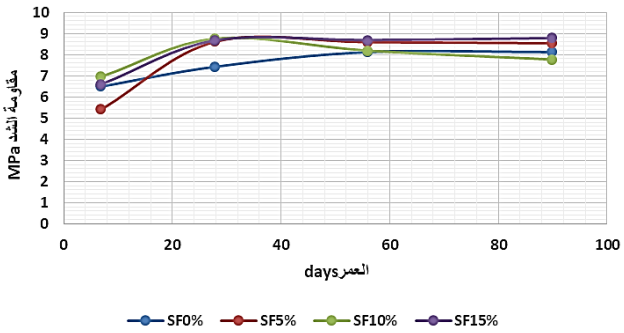
ثانياً: مقاومة الشد بالانعطاف

- أظهرت جميع العينات المحتوية على SF مقامة شد أعلى من العينات



الشكل 1: تغير وزن عينات الـOPC مع تغير نسبة السليكافيوم والعمر

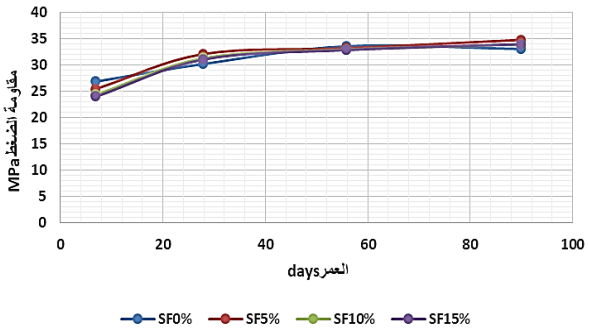
عمر 90 يوماً (8.78 MPa)، بزيادة قدرها 22% عن العينات المرجعية (7.48 MPa). الشكل (2)، يعود ذلك إلى تحسين البنية الدقيقة للمنطقة الانتقالية البينية (ITZ) وزيادة كمية C-S-H الناتجة عن التفاعل البوزولاني [5]. ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أن العينات ب 10% SF أظهرت مقاومة شد أعلى من 5% SF في معظم الأعمار، مما يؤكد فعالية النسبة 10%.



الشكل 2: تغير مقاومة الشد عينات الـOPC مع تغير نسبة SFوالعمر

ثالثاً: مقاومة الضغط

أظهرت العينات المحتوية على 5% SF أداءً مميزاً في مقاومة الضغط منذ الأعمار الصغيرة (7 أيام) وحتى 90 يوماً، مسجلة 34.8 MPa عند 90 يوماً، متفوقة على العينات المرجعية (33.1 MPa) والعينات بـ10% SF (33.9 MPa) والعينات بـ15% SF (34.0 MPa). الشكل (3)، يعزى هذا التفوق إلى ان النسبة 5% حققت توازناً مثالياً بين تحسين الكثافة (تأثير الملء) وتحسين البنية الكيميائية (التفاعل البوزولاني) دون أن تؤدي إلى زيادة الطلب على الماء او تقليل قابلية التشغيل [8].



الشكل 3: تغير مقاومة الشد عينات الـOPC مع تغير نسبة SFوالعمر

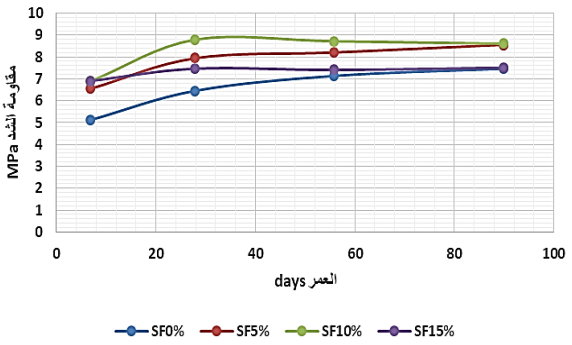
(جميع القيم هي متوسط 4 عينات لكل متغير)

تأثير السيليكافيوم في وسط حمض الكبريت

المرجعية في جميع الأعمار.

- تفوقت العينات بـ10% SF على غيرها، مسجلة 8.61 MPa عند 90 يوماً (بزيادة 13% عن المرجع 7.74MPa).
- أظهرت العينات بـ5% SF مقاومة شد 8.56 MPa عند 90 يوماً، بينما سجلت العينات بـ15% SF 7.51 MPa.

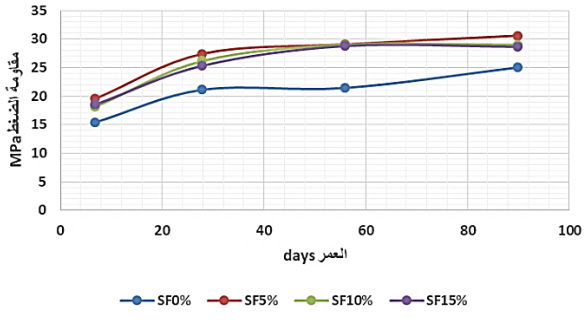
يمكن تفسير ذلك بأن التفاعل البوزولاني للسيليكافيوم يستهلك $Ca(OH)_2$، مما يقلل من كمية القلوية المتاحة للتفاعل مع الحمض، كما يزيد من كثافة العجينة، مما يبطئ انتشار أيونات H^+ وSO_4^{-2} [3]. ومع ذلك، فإن النسبة 15% قد تكون مفرطة وتؤدي إلى زيادة الطلب على الماء وتقليل قابلية التشغيل، مما يؤثر سلباً على البنية [9]. كما موضح في الشكل (5).



الشكل 5: تغير مقاومة الشد لعينات الـ OPC مع تغير نسبة SF وعمر العينات في الوسط الحمضي.

ثالثاً: مقاومة الضغط

- أظهرت العينات بـ5% SF أعلى مقاومة ضغط عند 90 يوماً (30.60 MPa)، بزيادة 15% عن العينات المرجعية (25.03 MPa).
- جاءت العينات بـ10% SF في المرتبة الثانية (19.01 MPa)، بينما سجلت العينات بـ15% SF 28.65 MPa.
- الملفت للنظر هو أن الزيادة في مقاومة الضغط كانت سريعة حتى 28 يوماً، ثم استقرت أو تباطأت بعد ذلك، مما يشير إلى شبه اكتمال تفاعل الإماهة. الشكل (6) يوضح ذلك.



الشكل 6: تغير مقاومة الضغط لعينات الـ OPC مع تغير نسبة SF وعمر العينات في الوسط الحمضي.

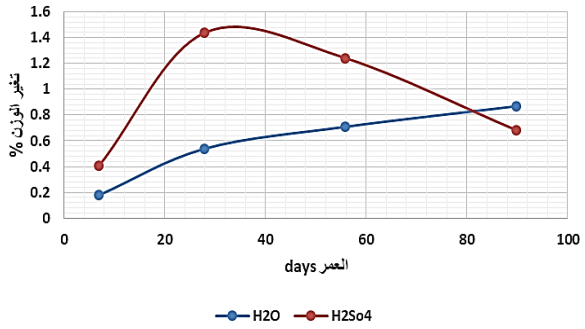
يمكن تفسير تفوق 5% SF في مقاومة الضغط بأنها وفرت توازناً مثالياً بين تحسين البنية الدقيقة والحفاظ على قابلية تشغيل جيدة، مما أدى إلى بنية خرسانية أكثر كثافة وقوة في وجه الهجوم الحمضي [5].

المقارنة مع الإسمنت المقاوم للكبريتات (SRC)

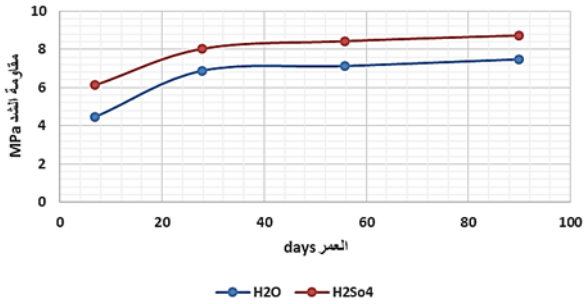
الجدول 7: القياسات الفيزيائية والميكانيكية لعينات SRC (بدون سيليكافيوم) في أوساط الحفظ

وسط الحفظ	عمر العينة	تغير الوزن (%)	مقاومة الشد (MPa)	مقاومة الضغط (MPa)
ماء (مرجع، PH≈7)	7	0.18	4.48	21.21
	28	0.54	6.89	27.81
	56	0.71	7.13	30.48
	90	0.87	7.48	32.14
حمض (5 g/L, PH≈1.2)	7	0.41	6.14	23.11
	28	1.44	8.04	31.13
	56	1.24	8.43	34.25
	90	0.68	8.73	35.87

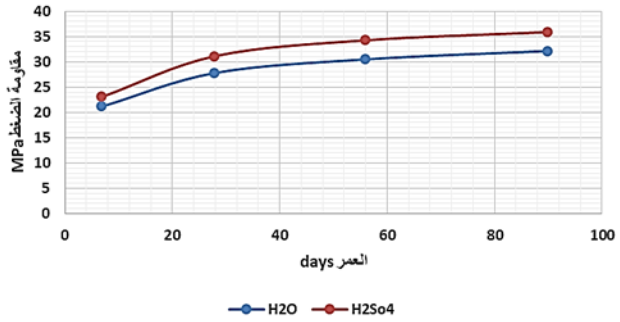
(جميع القيم هي متوسط 4 عينات لكل متغير)



الشكل 7: تغير وزن عينات الـSRC بتغير العمر ووسط الحفظ.



الشكل 8: تغير مقاومة الشد لعينات الـSRC بتغير العمر ووسط الحفظ.



الشكل 9: تغير مقاومة الضغط لعينات الـSRC بتغير العمر ووسط الحفظ.

مناقشة المقارنة مع SRC

من الجدول (7) والمقارنة مع الجدولين (5) و (6)، والاشكال (9-7) نلاحظ ان:

أولاً: مقاومة الضغط

- تفوقت عينات SRC على جميع عينات OPC+SF في مقاومة الضغط،

مسجلة ضغط، مسجلة 5.87MPa في الوسط الحمضي عند 90 يوماً (أعلى بنسبة 17% من OPC+5%SF و24% عن OPC+10%SF). يعود ذلك إلى التركيب الكيميائي الخاص بSRC (انخفاض C_3A إلى أقل من 5%) الذي يقلل تكوين الإترنجيت المسبب للتمدد والتشقق [11].

على الرغم من أن SRC يعرف بأنه إسمنت بطيء التصلب، إلا أنه في هذه الدراسة أظهر مقاومات مبكرة عند 7 و 28 يوماً أعلى من OPC+SF . يمكن تفسير ذلك بأن انخفاض محتوى C3A في SRC يقلل من تكون الإترنجيت في الأعمار المبكرة، مما يسمح بتطور أسرع للمقاومة في البيئات الكبريتية، على عكس OPC الذي يحتوي على نسبة أعلى من C3A.

ثانياً: مقاومة الشد بالانعطاف

- كانت عينات SRC (8.73 MPa) أعلى قليلاً من OPC+10%SF (8.61 MPa) وOPC+5%SF (8.56MPa).
- الفرق بسيط (حوالي 1-2%) مما يشير إلى أن السيليكافيوم يحسن مقاومة الشد بشكل مقارب لSRC.

ثالثاً: التغير الوزني (المؤشر الأهم)

- هنا الفارق كان جوهرياً لصالح OPC+10%SF (-1.17%) وOPC+5%SF (-1.77%) مقارنة بSRC (+0.68%).
- هذا يعني ان السيليكافيوم يحسن الثبات الوزني (مقاومة التشرب وفقدان المادة) بشكل أفضل بكثير من SRC.
- في البيئات الرطبة او المغمورة، يكون التحكم في التشرب عاملاً حاسماً للمتانة طويلة الأمد [1].

على الرغم من أن SRC يتفوق في مقاومة الضغط المطلقة، فأن الخرسانة OPC+SF (خاصة بنسبة 10%) تقدم مقاومة أفضل للتشرب وفقدان الوزن، وهو عامل حاسم في المتانة طويلة الأمد، خاصة في البيئات الرطبة او المغمورة. يمكن اعتبار OPC+10%SF بديلاً اقتصادياً وفعالاً عن SRC، خاصة في التطبيقات التي تتطلب مقاومة كيميائية عالية مع تكلفة أقل.

التحليل الإحصائي

تم إجراء اختبار ANOVA أحادي الاتجاه (One-Way ANOVA) لمقارنة الفروق بين النسب المختلفة (0%، 5%، 10%،15%) من SF في الوسط الحمضي عند 90 يوماً. أظهرت النتائج (الجدول 7) فروقاً ذات دلائل إحصائية قيمة ($P<0.05$) بين معظم النسب، باستثناء الفرق بين 10% و15% في مقاومة الضغط ($P=0.08$).

الجدول 7: نتائج اختبار ANOVA لمقارنة نسب SF في الوسط الحمضي عند عمر 90 يوماً

الدلالة (عند 0.05)	قيمة P	قيمة F	المتغير
فروق ذات دلالة	0.002	8.24	مقاومة الضغط
فروق ذات دلالة	0.007	6.91	مقاومة الشد
فروق ذات دلالة	0.001	12.35	التغير الوزني

كما بلغ معامل التباين (Coefficient of Variation) لجميع القياسات أقل من 0.05، مما يؤكد دقة وموثوقية التجارب.

مناقشة آليات المقاومة

بناءً على النتائج السابقة، يمكن تلخيص آليات عمل السيليكافيوم في مقاومة الهجوم الحمضي كما يلي:

1. انخفاض القلوية: يستهلك التفاعل البوزولاني للسيليكافيوم $Ca(OH)_2$، مما يخفض PH الخرسانة من 13 إلى حوالي 12.5-11.5 (كما ورد في الجدول 1)، مما يقلل من سرعة تفاعل الحمض نع القلوية [10,3].

2. تقليل النفاذية: تعمل جزيئات SF النانوية على ملء الفراغات بين حبيبات الإسمنت، وسد الشعيرات والشقوق الدقيقة، مما يقلل من نفاذية الخرسانة، ويبطئ انتشار أيونات H^+ وSO_4^{-2} إلى داخلها [9].

3. تعزيز المنطقة الانتقالية (ITZ): يحسن السيليكافيوم التماسك بين العجينة الإسمنتية والركام، مما يقلل من مسارات النفاذية في المنطقة البينية [5].

4. زيادة محتوى C-S-H: يزيد التفاعل البوزولاني من كمية C-S-H (المادة الرابطة الرئيسية)، مما يعزز التماسك الداخلي والمقاومة الميكانيكية [7].

تأثير النتائج على الاقتصاد والبيئة والمجتمع

الأثر الاقتصادي

- توفير 10% من كمية الإسمنت المستخدمة، مما يخفض تكلفة المواد الأولية.
- إطالة العمر الافتراضي للمنشآت الخرسانية في البيئات العدوانية، مما يقلل تكاليف الصيانة والإصلاح.
- تقديم بديل اقتصادي عن الإسمنت المقاوم للكبريتات (SRC) الذي يتطلب عمليات تصنيع أكثر تعقيداً وتكلفة أعلى [2].

الأثر البيئي

- تقليل البصمة الكربونية: كل طن من الإسمنت البورتلاندي ينتج حوالي 1.0-0.8 طن من CO_2 استخدام 10% سيليكافيوم يقلل الانبعاثات بنسبة مماثلة [16,15].
- إعادة تدوير المخلفات الصناعية: السيليكافيوم هو منتج ثانوي لصناعة السيليكون، واستخدامه يمنع تراكمه في مكبات النفايات.
- توفير الموارد الطبيعية: يقلل من استهلاك المواد الخام اللازمة لصناعة الإسمنت.

الأثر الاجتماعي

- تحسين جودة الحياة من خلال زيادة متانة المنشآت الخرسانية وحماية صحة وسلامة السكان.
- خلق فرص عمل في تطوير صناعة الإضافات البوزولانية المحلية.
- نقل التكنولوجيا وتطير الكفاءات الهندسية المحلية.

الاستنتاجات

1. النسبة المثلى: نسبة الاستبدال 10% من السيليكافيوم عن الإسمنت البورتلاندي العادي (OPC) هي الأفضل لمقاومة وسط حمض الكبريت بتركيز 5 g/L (PH≈1.2) حيث حققت:

- أعلى مقاومة للضغط (29.01 MPa) ومقاومة للشد بالانعطاف (8.61 MPa) عند عمر 90 يوماً.
- أقل تغير وزني (-1.17%)، مما يدل على أفضل ثبات كيميائي وفيزيائي.
- توازناً مثالياً بين تحسين الكثافة (تأثير الملء) وتحسين البنية الكيميائية (التفاعل البوزولاني).

2. التفوق على الإسمنت المقاوم للكبريتات (SRC):

على الرغم من أن SRC تفوق في مقاومة الضغط 35.87Mpa فإن خرسانة

OPC+10%SF أظهرت ثباتاً وزنياً أفضل بكثير مما يجعلها خياراً أكثر فعالية
- يمكن اعتبار OPC+10%SF بديلاً اقتصادياً وفعالاً عن SRC.

3. استمرار الفعالية: استمر تحسن المقاومة حتى عمر 90 يوماً، مما يؤكد استمرار التفاعل البوزولاني للسيليكافيوم على المدى الطويل.

4. آلية العمل: تحسين المقاومة من خلال آليتين متكاملتين (فيزيائياً: ملء الفراغات وتقليل النفاذية (تحسين المقاومة من خلال آليتين متكاملتين عبر التفاعل البوزولاني)، وكيميائياً: استهلاك $Ca(OH)_2$).

5. الدقة الإحصائية: أظهرت النتائج تشتتاً منخفضاً (معامل تباين <0.05) وفروقاً ذات دلالة إحصائية (ANOVA, P<0.05).

التوصيات

- استخدام نسبة 10% سيليكافيوم في الخلطات الخرسانية المعرضة للبيئات الكبريتية أو الحمضية الشديدة.
- في حال الأولوية للمقاومة الميكانيكية المطلقة، يمكن استخدام 5% سيليكافيوم مع مراعاة فقدان وزني أعلى.
- في البيئات الرطبة أو المغمورة.
- دراسة التأثير المشترك للسيليكافيوم مع مواد بوزولانية أخرى.
- استخدام تقنيات الفحص المتقدمة (TGA, XRD, SEM).
- دراسة السلوك طويل الأمد (أكثر من سنة) للخرسانة المحتوية على SF.
- اعتماد إلزامية استخدام الإضافات المحسنة في المواصفات الوطنية للبيئات العدوانية.
- إنشاء قاعدة بيانات وطنية لخواص الإسمنت والإضافات المحلية.
- تحديث الكود العربي السوري للخرسانة المسلحة.
- إجراء اختبارات مسبقة للخلطات الخرسانية.
- التأكد من جودة السيليكافيوم ومطابقته للمواصفات [20].
- مراعاة تأثير السيليكافيوم على قابلية التشغيل.
- الاهتمام بظروف المعالجة الرطبة (7 أيام على الأقل

Author Contributions: "**Dalia**: Conceptualization and methodology, writing—original draft preparation, review and editing; **Abdulkader**: Data collection. Both authors have read and agreed to the published version of the manuscript."

Funding: "This research received no external funding."

Data Availability Statement: " All data obtained in this study are available in the tables and figures included in the article. The raw data (individual measurements for each specimen) are available from the corresponding author upon reasonable request."

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

Acknowledgments: "The authors would like to express their sincere gratitude to Professor Dr. Ahed Khazzam, President of the National Private University in Hama, and Dr. Hazem Mallali, Vice President of the University for Scientific Research Affairs, for their continuous support of scientific research, their diligent follow-up of the latest developments in research, and their ongoing encouragement of scientific research in accordance with established academic standards."

References

[1] P. Mehta, and P. Monteiro. "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials." *4th ed. New York: McGraw-Hill Education,* 2014. https://www.mhprofessional.com/concrete-microstructure-properties-and-materials-9780071797870-usa

[2] M. Neville. "Properties of Concrete." *5th ed. London: Pearson Education,* 2011. https://www.pearson.com/properties-of-concrete.

[3] M. Bassuoni, and M. Nehdi. "Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive PH reduction." *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 7, pp. 1070-1084, 2007. https://doi.org/ 10.1016/j.cemconres.2007.03.016

[4] E. Hewayde, M. Nehdi, E. Allouche, and G. Nakhla. "Effect of mixture design parameters and wetting-drying cycles on the resistance of concrete to sulfuric acid attack." *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 155-163, 2007. https://doi.org/ 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:2(155)

[5] M. Khan and R. Siddique. "Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties." *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 57, pp. 30-35, 2011. https://doi.org/ 10.1016/j.resconrec.2011.09.016

[6] A. Allahverdi and F. Škavára. "Nitric acid attack on hardened paste of geopolymeric cements." *Ceramics-Silikáty*, vol. 44, no. 3, pp. 122-128, 2000. http://www.ceramics-silikaty.cz/2000/pdf/2000_03_122.pdf

[7] V. Malhotra and P. Mehta. "Pozzolanic and Cementitious Materials." *1st ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press*, 1996. https://doi.org/10.1201/9781482296761

[8] ACI Committee 234. "Guide for the Use of Silica Fume in Concrete (ACI 234R-96)." *Farmington Hills, MI: American Concrete Institute,* 2005. https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=234R96

[9] R. Siddique and M. Khan. "Supplementary Cementing Materials." *Springer Science & Business Media*, 2011. https://doi.org/ 10.1007/978-3-642-17866-5

[10] S. Al-Dullajjan, M. Maslehuddin, M. Al-Zahrani, A. Sharif, and M. Shameem. "Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate." *Cement and Concrete Composition*, vol. 25, no. 4-5, pp. 429-437, 2003. https://doi.org/ 10.1016/S0958-9465(02)00082-3

[11] M. Thomas, M. Shehata, S. Shashiprakash, D. Hopkins, and K. Cail. "The effect of supplementary cementing materials on the permeability of chloride and sulfate ions in concrete." *in Proceedings of the 8th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, SP-178, pp. 663-680, 1999. https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/11158

[12] Ministry of Irrigation, Syrian Arab Republic. "Water Balance Study Project for the Coastal Basin: Chemical Analysis of Water Points." Damascus, Syria, 2013. http://www.reefnet.gov.sy/

[13] Engineers Syndicate, Damascus, *Syrian Arab Code for the Design and Construction of Reinforced Concrete Structures*. Damascus, Syria, 2004. http://www.syrianengineers.org/

[14] D. Awlad and A. Al-Joundi. "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." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, pp. 10–22, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpas.sp_FISCSDR2026_02

[15] 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.

[16] M. Inweer, et al. "Carbon footprint life cycle assessment of cement industry in Libya." *Discover Concrete and Cement*, vol. 1, Art. no. 37, 2025. https://doi.org/10.1007/s44416-025-00037-1

[17] H. Al-Zaidi, M. Ben Hkoma, and N. Fathi. "Green Accounting And Environmental Disclosure In Libyan Industrial Companies: Application Status And Challenges At The National Cement Company." *Wadi Alshatti University Journal of Human Sciences*, vol. 1, no. 2, pp. 110-125, 2025. https://doi.org/10.63318/waujhsv1i2_08

[18] S. Alferjani, M. Altaif, and A. Sadaga. "Effect of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) on Properties of Self-Compacting Concrete." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 165-174, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_17

[19] A. Saidy, and F. Farouj. "Effectiveness of Calcium Hydroxide as an Alkaline Activator of Geopolymer Mortar." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 132-137, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_16

[20] 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: 10.63318/waujpasv3i2_10.

[21] E. Alajwad and A. Akasha, "Resistance of Geopolymer Mortar to Sulphates Attack (Using Local Pozzolana in Southern Libya)." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 2, no. 1, pp. 90–94, 2025. https://doi.org/10.63318/

[22] 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, Mar. 2025, doi: 10.63318/.

[23] ASTM International. "Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures (ASTM C1240-20)." *West Conshohocken, PA, USA: ASTM International*, 2020. https://doi: 10.1520/C1240-20.