تعزيز المقاومة الكيميائية للخرسانة المقاومة للكبريتات باستخدام السيليكافيوم في وسط حمض الكبريت

عبد القادر الجندي*

(الإيداع: 13 تشرين الثاني 2025، القبول: 17 آذار 2026)

الملخص:

تُعد الخرسانة من أهم مواد البناء المستخدمة في العالم، ولكنها غالبًا ما تواجه تحديات كبيرة في البيئات القاسية، خاصة تلك المعرضة لهجمات الكبريتات والأحماض. في هذا السياق، تبرز السيليكا فيوم (غبار السيليكا) كمادة مضافة تُعزز من مقاومة الخرسانة بشكل ملحوظ، وتُحسن من أدائها في الظروف الصعبة التي تحتوي على حمض الكبريت. يُركز هذا البحث على الدور الحيوي للسيليكا فيوم في تعزيز متانة الخرسانة المقاومة للكبريتات في بيئة حمض الكبريت، مع استعراض الآليات الكيميائية والميكانيكية التي تدعم هذا التحسين، تُعد الكبريتات مادة ضارة بالخرسانة، حيث تتفاعل مع مركبات الإسمنت، مثل سيليكات ثلاثي الكالسيوم، مما يؤدي إلى زيادة في الحجم وتشققات تؤثر على سلامة الهيكل الخرساني.

تم صب 30 مكعب خرساني (15*15*15) وحفظها في وسط حمض الكبريت الممدد بتركيز 5g/l بالإضافة للماء كوسط مرجعي. وتراوحت اعمار العينات (7–28–56–90)days . كما أن نسب الاستبدال كانت (0–5–10–15) % من وزن الإسمنت.

فيما يتعلق بالبيئات الحمضية، مثل تلك التي تحتوي على حمض الكبريت، فإن السيليكا فيوم تلعب دوراً في زيادة مقاومة الخرسانة. لأن السيليكا فيوم، بفضل بنيتها وكثافتها، يمكن أن تقلل من تغلغل المواد الضارة إلى داخل بنية الخرسانة، وبالتالي تعزيز مقاومتها الشاملة في البيئات القاسية. كما تشير النتائج البحث إلى أن الخرسانة التي تحتوي على السيليكا فيوم تحقق مقاومة ضغط عالية نسبياً مقارنةً بالخرسانة التي لا تحتوي سيليكا فيوم في تركيبها، بزيادة بلغت 25%، كما أن نفاذية العينات الحاوية على نسبة 15% كانت منخفضة مقارنة مع العينات الأخرى المختلفة عنها بنسب الاستبدال.

الكلمات مفتاحية: الخرسانة المقاومة للكبريتات، حمض الكبريت، تآكل الخرسانة، السيليكافيوم، نفاذية الخرسانة، المقاومة على الضغط.

*أستاذ مساعد– اختصاص مواد بناء ومصنوعاتها– كلية الهندسة المدنية – جامعة حماة.

Enhancing the Chemical Resistance of Sulfate-Resistant Concrete Using Silica Fume in Sulfuric Acid Environment

Abdelkader Al-Gendy*

(Received: 13 November 2025, Accepted: 17 March 2026)

Abstract:

Concrete is one of the most important building materials used worldwide, yet it often faces significant challenges in harsh environments, particularly those exposed to sulfate and acid attacks. In this context, silica fume emerges as an additive that significantly enhances the resistance of concrete and improves its performance in severe conditions containing sulfuric acid. This research focuses on the vital role of silica fume in enhancing the durability of sulfate-resistant concrete in a sulfuric acid environment, reviewing the chemical and mechanical mechanisms that support this improvement. Sulfates are harmful to concrete as they react with cement compounds, such as tricalcium silicate, leading to volume expansion and cracking that compromise the structural integrity of the concrete. A total of 30 concrete cubes (15×15×15 cm) were cast and stored in a diluted sulfuric acid medium with a concentration of 5 g/l, along with water as a reference medium. The testing ages ranged from 7 to 90 days (7, 28, 56, 90), and the replacement ratios were 0%, 5%, 10%, and 15% by weight of cement.

Regarding acidic environments, such as those containing sulfuric acid, silica fume plays a role in increasing concrete resistance. Due to its structure and density, silica fume can reduce the penetration of harmful substances into the concrete matrix, thereby enhancing its overall resistance in aggressive environments. Research findings also indicate that concrete containing silica fume achieves a comparatively higher compressive strength—by up to 25%—than concrete without silica fume. Additionally, samples with a 15% replacement ratio exhibited lower permeability compared to other samples with different replacement ratios.

Keywords: Sulfate-resistant concrete, sulfuric acid, concrete corrosion, silica fume, concrete permeability, compressive strength.

*Assistant Professor - Specializing in Building Materials and Their Products - Faculty of Civil Engineering, Hama University.

1-مقدمة:

السيليكا فيوم لها أثر مهم في زيادة مقاومة الخرسانة، خاصة في البيئات التي تحتوي على حمض الكبريت. تعمل جزيئات السيليكا فيوم الدقيقة على ملء الفراغات بين حبيبات الإسمنت، مما يقلل من نفاذية الخرسانة ويساهم في تقليل التفاعل الضار بين الكبريتات والمكونات الكيميائية في الخرسانة. إضافة إلى ذلك، فإن السيليكا فيوم تتفاعل بشكل بوزولاني مع كربونات الكالسيوم لتكوين مركبات أقل ذوبانًا وأكثر صلابة، مما يعزز من خواص الخرسانة مثل مقاومة الضغط ومقاومة التآكل الكيميائي.

كما أن استخدام الإسمنت المقاوم للكبريتات مع إضافة السيليكا فيوم يزيد من متانة الخرسانة في البيئات القاسية التي تحتوي على كبريتات، حيث يقلل من معدل امتصاص الماء وبالتالي يحد من التشققات الناتجة عن تمدد الكبريتات داخليًا في الخرسانة، مما يطيل عمر المنشآت ويعزز صلابتها[1].

من الناحية الكيميائية، السيليكا فيوم تحتوي على نسبة عالية من أكاسيد السيليكون التي تساهم في تفاعل بوزولاني مع هيدروكسيد الكالسيوم الناتج من تفاعل الإسمنت والماء، مما يقلل تركيز مركبات هيدروكسيد الكالسيوم القابلة لهجوم الكبريتات، ويساعد في تحسين استقرار المصفوفة الخرسانية ضد التآكل في وسط حمضي مثل حمض الكبريت [2].

2-الخصائص الاستثنائية للسيليكا فيوم:

السيليكا فيوم، المعروفة أيضًا بالميكروسيليكا، هي منتج ثانوي من عمليات إنتاج سبائك الفيروسيليكون أو السيليكون المعدني. تتميز بجزيئات دقيقة جدًا، أصغر بحوالي 100 مرة من حبيبات الإسمنت، وتحتوي على نسبة عالية من ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2). هذه الدقة الفائقة والتركيبة الكيميائية تجعلانها مادة بوزولانية نشطة، قادرة على التفاعل مع هيدروكسيد الكالسيوم ($Ca(OH)_2$) الناتج عن عملية إماهة الإسمنت.

3-آليات عمل السيليكا فيوم في الخرسانة:

تؤثر السيليكا فيوم على الخرسانة من خلال آليتين رئيسيتين:

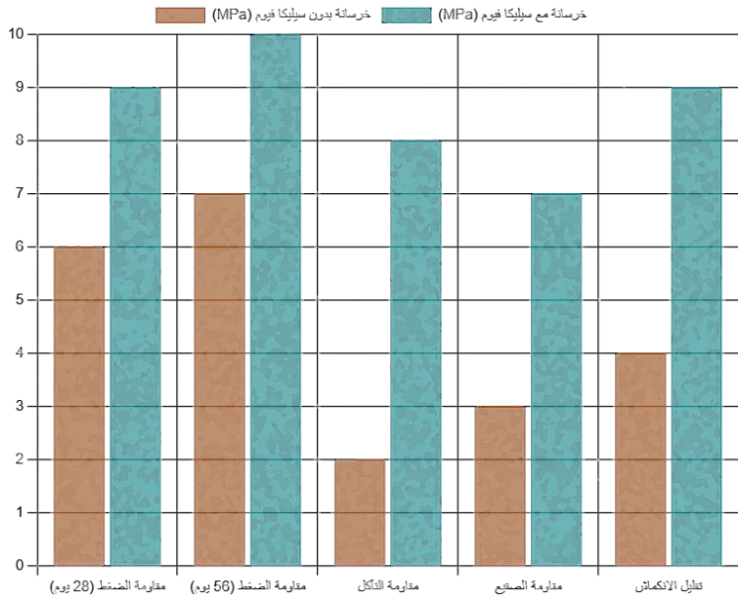
3-1-التأثير الفيزيائي: ملء الفراغات الدقيقة

بفضل حجم جزيئاتها النانوي، تعمل السيليكا فيوم على ملء المسام والفراغات الدقيقة جدًا بين حبيبات الإسمنت، مما يزيد من كثافة البنية الخرسانية ويقلل بشكل كبير من نفاذيتها. هذا التعبئة الفائقة تمنع تغلغل العوامل الضارة مثل شوارد الكبريتات والمحاليل الحمضية إلى داخل الخرسانة، وبالتالي تحميها من التدهور الداخلي. هذه الخاصية تُعزز بشكل كبير من متانة الخرسانة في البيئات العدوانية.

3-2-التأثير الكيميائي: التفاعل البوزولاني

السيليكا فيوم تتفاعل كيميائيًا مع هيدروكسيد الكالسيوم ($Ca(OH)_2$)، وهو منتج ثانوي ضعيف وغير مستقر ينتج عن إماهة الإسمنت. هذا التفاعل البوزولاني يُنتج مركبات سيليكات الكالسيوم المائية (C–S–H)، وهي نفس المركبات التي تمنح الإسمنت قوته وصلابته. من خلال تحويل هيدروكسيد الكالسيوم إلى مركبات C–S–H أكثر استقرارًا، تُصبح المصفوفة الخرسانية أكثر مقاومة لهجوم الكبريتات، حيث أن الكبريتات تتفاعل غالبًا مع هيدروكسيد الكالسيوم لتكوين الجبس والإترنجيت، مما يؤدي إلى التمدد والتشقق.

يوضح الرسم البياني الآتي الفرق الكبير في الأداء بين الخرسانة التقليدية والخرسانة المعززة بالسيليكا فيوم، خاصة فيما يتعلق بمقاومة الكبريتات والأحماض، وتقليل النفاذية، وتحسين مقاومة الضغط.



الشكل رقم (1) الفرق في الأداء بين الخرسانة التقليدية والخرسانة المعززة بالسليكا فيوم

4-أثر السيليكا في مقاومة الخرسانة للكبريتات وسط حمض الكبريت:[6-5-4-3]

1. **تعزيز البنية الميكانيكية والأداء الكيميائي** :تعمل السيليكا على تحسين كثافة البنية الخرسانية وزيادة قلويتها، مما يقلل من مساميتها ويمكّنها من مقاومة اختراق الكبريتات والأحماض. إضافة إلى أن السيليكا يُعزز من تفاعلية الإسمنت مع الماء والمواد المضافة، مما يُسهم في تكوين بنية أكثر قوة وتماسكاً، تقلل من نفاذية الوسط.
2. **تفاعل السيليكا مع مركبات الكبريتات** :تحت الظروف الحمضية، تتفاعل مكونات السيليكا مع الكبريتات وتكوّن مركبات سيليكات ذات قدرة على تثبيط تداخل الكبريتات في بنية الخرسانة، مما يقلل من تكوين الكبريتيدات التي تُسبب التآكل والانهيار المبكر.التفاعلات الكيميائية بين السيليكا والكبريتات تُساهم في تقليل الانتشار الكيميائي للكبريتات داخل المونة الخرسانية.
3. **زيادة مقاومة التدهور الناتج عن الوسط الحمضي** :نتيجةً لزيادة انتظام بناء الخرسانة وتقليل المسامات، تزيد السيليكا من مقاومة التداخل الحمضي، خاصةً في وجود حمض الكبريت الذي يُسبب تفاعلات حمضية تؤدي إلى تآكل الخرسانة، فالسليكا يُساعد على حماية المكون الإسمنتي من تلك التأثيرات.
4. **التحسين الهيكلي وتقليل التشققات** :الأبحاث أظهرت أن إضافة السيليكا تقلل من تشققات التمدد الناتجة عن التفاعل مع الوسط الحمضي، الأمر الذي يُعزز من عمر الخرسانة ومتانتها. تحسين التماسك الداخلي يقلل من تسرب المواد الكيميائية الضارة، مما يُطيل من عمر المنشآت.

5-البرنامج التجريبي:

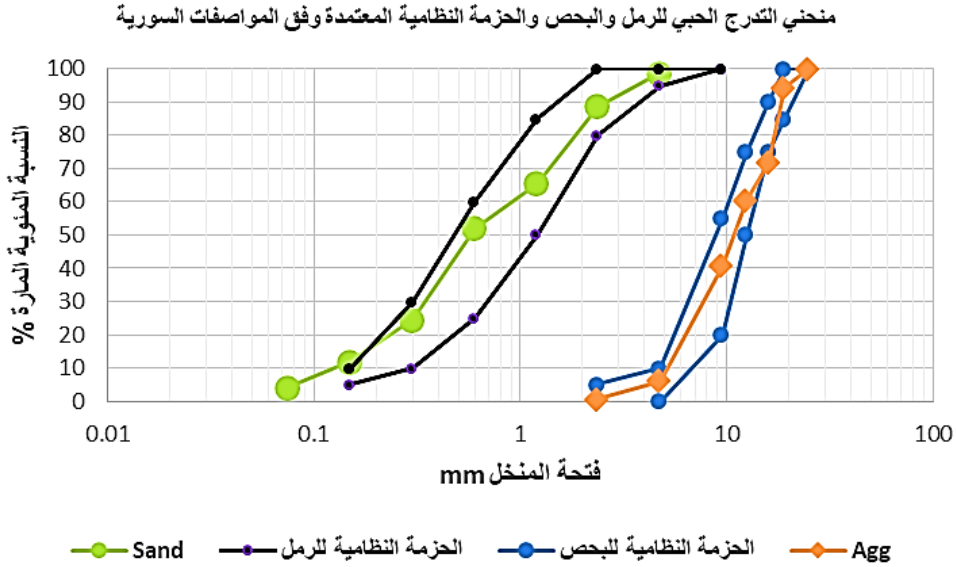
5-1 مواد البحث:

- إسمنت مقاوم للكبريتاتSRC : ينتج وفق المواصفة السورية 121 الصادرة عن وزارة الصناعة وينتج في معمل إسمنت حماه.

- المواد الحصوية المستعملة في العينات الخرسانية المُنتجة: الحصويات الخشنة المستخدمة في هذه التجارب هي من إنتاج محلي من مقالع منطقة حسياء السورية وهي عبارة عن مزيج من تدرجين حبيين من حصويات طبيعية مكسرة، أما الرمل المستخدم فهو مزيج من رمل طبيعي قرواني ورمل خشن مكسر.

ومن أجل تصميم الهيكل الحصوي للخلطات الخرسانية لابد من إجراء مجموعة من التجارب:

5-2-تجربة التحليل الحبي للحصويات الناعمة والخشنة "الرمل والبحص" للخروج بأفضل تدرج حبي مناسب للبحث القائم. تم إجراء هذه التجربة وفق المواصفات **ASTM C 136،AASHTO T27-78** وكانت النتائج كما يأتي:



الشكل رقم (2): منحني التحليل الحبي للحصويات المستخدمة والحزمة النظامية المعتمدة وفق المواصفات السورية.

5-3-تجربة لوس انجلوس لتعيين الفاقد بالاهتراء:

تم إجراء هذه التجربة وفق المواصفات **ASTM C131, AASHTO T96-77**



الشكل رقم (3): جهاز لوس أنجلوس المستخدم في إجراء التجربة.

وكانت نتائج التجربة كما في الجدول الآتي:

الجدول رقم (1): نتائج الفاقد بالاهتراء لعينة الحصويات الخشنة.

وزن العينة gr	5000
الوزن المتبقي على المنخلgr	4148
L.Aمعامل الاهتراء	%17.04

وبالتالي يعد البحص المختبر مقبولاً في أعمال الخرسانة الإسمنتي والبيتوميني وذلك لأن معامل الاهتراء أقل من 30%.

5-4-تجربة المعادل (المكافئ) الرملي:

أجري هذا الاختبار وفقاً لـ **ASTM D 2419** ويبين الجدول (2) الآتي قيم المعادل الرملي المقبول ومجالات استخدامه كما يبين الجدول (3) نتائج التجربة على الرمل المستخدم في البحث:

الجدول رقم (2): العلاقة بين قيمة المعادل الرملي ومجال استعمال الرمل حسب مواصفات مخبر الطرق والجسور بباريس.

نوع الرمل	**المعادل الرملي (E.S)**		**مجال الاستعمال**
	بواسطة المكبس	**بالنظر**	
مقبول	60	65	**خرسانة عادي**
نظيف	70	75	**خرسانة بمقاومة عالية نسبياً**
نظيف جداً	75	80	**خرسانة عالي المقاومة أو خرسانة خاص**

الجدول رقم (3): نتائج تجربة المكافئ الرملي للرمل المستخدم.

نوع الرمل	**العينة**	**E.S قيمة المكافئ الرملي %**
رمل مكسر Sand2	1	73.333
	2	70.992
رمل طبيعي Sand1	3	80.229
	4	81.094

وعليه ووفق الجدول (2) فالرمل المستخدم نظيف ويصلح للاستخدام في إنتاج خرسانة بمقاومة عالية نسبياً.

الجدول رقم (4): الخصائص الفيزيائية للحصويات المستخدمة في إجراء البحث.

المادة	بحص ناعم agg1	بحص خشن agg2	رمل طبيعيsand1	رمل مكسر sand2
وزن نوعي	2.61	2.61	2.54	2.52
وزن حجمي t/m^3	1.62	1.61	1.6	1.6

5-5-تعيين السطح النوعي بواسطة جهاز بلين:

أجري هذا الاختبار وفق المواصفة ASTM C204-72 وهي تتوافق مع AASHTO T153-74

باستخدام جهاز بلين وكانت النتائج كالآتي:

الجدول رقم (5): السطح النوعي للإسمنت والإضافات المستخدمة.

المادة	السطح النوعي cm^2/gr	
	بلين	منخل
الإسمنت المقاوم للكبريتات	3099.87	3000

وهذه القيم مقبولة إذ أنها ضمن المجال المقبول لنعومة الإسمنت البورتلاندي المستخدم في القطر إذ تنحصر في المجال Cm2/gr (3000 –3500) عدا هباب السيليس الذي يمتاز بسطح نوعي أكبر من الإسمنت بدرجة كبيرة يتم قياسه بواسطة إجراء تجربة تكثيف النتروجين.

5-6-الخصائص الفيزيائية للإسمنت المستخدم:

تم إجراء التجارب التي تحدد الخواص الفيزيائية للإسمنت المستخدم وفق ASTM C403 وASTM C191-71 و ASTM C188 وهي تحقق المواصفات AASHTO T131-74، NFP15-402، NFP15-403، NFP15-432 وكانت النتائج الآتية:

الجدول رقم (6): الخصائص الفيزيائية للإسمنت المستخدم في البحث.

نوع الإسمنت	زمن بداية الأخذ (min)	زمن نهاية الأخذ (min)	ثبات الحجم لوشاتولييه (mm)	الوزن النوعي
SRC	145	245	2	3.1

5-7-الخصائص الميكانيكية للإسمنت المستخدم في البحث:

تم إجراء التجارب وفق المواصفة**ASTM C349** وحصلنا على النتائج الآتية:

الجدول رقم (7): الخصائص الميكانيكية للإسمنت المقاوم للكبريتات

نتائج عينة الإسمنت المقاوم للكبريتات	
الشد بالانعطاف (Mpa)	
28 days	7 days
8.2	6.8
المقاومة على الضغط (Mpa)	
28 days	7 days
*32.8	22.7

*وهذه القيم الناتجة مقبولة ويمكن تصميم الخلطة الخرسانية عليها لأنها أكبر من 32.5 Mpa صنف الإسمنت المستخدم في إجراء التجربة.

يبين الجدول الآتي العيار الوزني لمكونات الخرسانة المستخدم في الخلطات المرجعية:

الجدول رقم (8): عيار المكونات في 1m3 من الخلطة المرجعية

اسم المكوّن		الوزن (Kg/m^3)
حصويات خشنة "بحص"	Agg1	770
	Agg2	515
حصويات ناعمة "رمل"	Sand1	335
	Sand2	324
إسمنت		400
W/C		%53
ماء		212
ملدن "نسبة من وزن الإسمنت"		1.5%
هبوط أبرامز النظري		Cm11

6-التفاعل البوزولاني: (استهلاك هيدروكسيد الكالسيوم)[12]

السيليكافيوم غنية بأكاسيد السيليكون (SiO_2) في شكلها غير المتبلور، والذي يمكن أن يشكل 85–95% من تركيبها. عند دمجها في خليط الخرسانة، تتفاعل هذه السيليكا النشطة كيميائيًا مع هيدروكسيد الكالسيوم($Ca(OH)_2$) ، وهو منتج قلوي يتكون أثناء عملية هيدرة الإسمنت (تفاعل الإسمنت مع الماء). يُعرف هذا التفاعل بالتفاعل البوزولاني، ونتيجته هي تكوين مركبات كالسيوم سيليكات هيدرات

(C–S–H) إضافية، وهي المادة الأساسية المسؤولة عن قوة وتماسك الخرسانة.

$$SiO2 + Ca(OH)2 \rightarrow C - S - H$$

هذه العملية لا تزيد فقط من كميةC–S–H ، مما يعزز من قوة ومقاومة الخرسانة، بل تستهلك أيضًا هيدروكسيد الكالسيوم الحر، الذي يُعد المكون الرئيسي المسؤول عن القلوية العالية للخرسانة.

6-1-انخفاض مستوى الحموضة (pH) على المدى الطويل:[15]

يؤدي استهلاك $Ca(OH)_2$ إلى انخفاض تدريجي في تركيز أيونات الهيدروكسيد (OH^-) في المحلول المسامي للخرسانة. هذا الانخفاض يترجم مباشرة إلى انخفاض في مستوى pH الخرسانة. بينما تكون الخرسانة التقليدية ذات pH مرتفع جدًا (حوالي 12–13)، يمكن أن يؤدي استخدام 5–15% من السيليكافيوم كبديل لوزن الإسمنت إلى خفض هذا المستوى إلى أقل من 12، خاصة بعد 28 يومًا أو أكثر من المعالجة. هذا التأثير يكون أكثر وضوحًا على المدى الطويل حيث يستمر التفاعل البوزولاني ببطء، مما يعزز من كثافة البنية ويقلل من حجم البلورات في المصفوفة.

6-2-تأثير السيليكافيوم على pH الخرسانة:[13]

الجدول التالي يوضح التأثير التقريبي للسيليكافيوم على مستوى pH الخرسانة بمرور الوقت:

الجدول رقم (9): التأثير التقريبي للسيليكافيوم على مستوى pH الخرسانة بمرور الوقت.

النسبة المئوية للسيليكا	PH الخرسانة بدون سيليكا عند 28 يوم	PH الخرسانة مع سيليكا عند 28 يوم	PH الخرسانة مع سيليكا عند 56 يوم
0	13.5-12.5	-	-
10-5	-	12.5-11.5	12-11
15-10	-	12-11	10.5-11.5

يجب الإشارة إلى أن هذا الانخفاض في القلوية ليس سلبيًا بالضرورة، بل إنه مفيد في معظم التطبيقات لتقليل مخاطر التفاعلات الكيميائية الضارة، مع الحفاظ على قلوية كافية لحماية حديد التسليح من التآكل[15-14-13-12].

7-خلط وصب وحفظ القوالب الخرسانية:

تم إجراء هذه التجربة وفقاً لـ ASTM C192-76 وهي مطابقة لـ AASHTO T126-76

بعد صب القوالب الخرسانية Cm(15*15*15) وتسوية سطحها جيداً تم حفظها في جو المخبر مع مراعاة أن تكون الشروط نظامية (20±3C°) ورطوبة نسبية عالية لا تقل عن (90%) ولمدة 24 ساعة قمنا بفك القوالب وحفظ العينات في أوساط الحفظ المختارة (الوسط المرجعي "ماء" والوسط الجديد المدروس "حمض الكبريت بتركيز 5g/l").

7-1-تجربة تعيين المقاومة على الضغط للعينات الخرسانية:

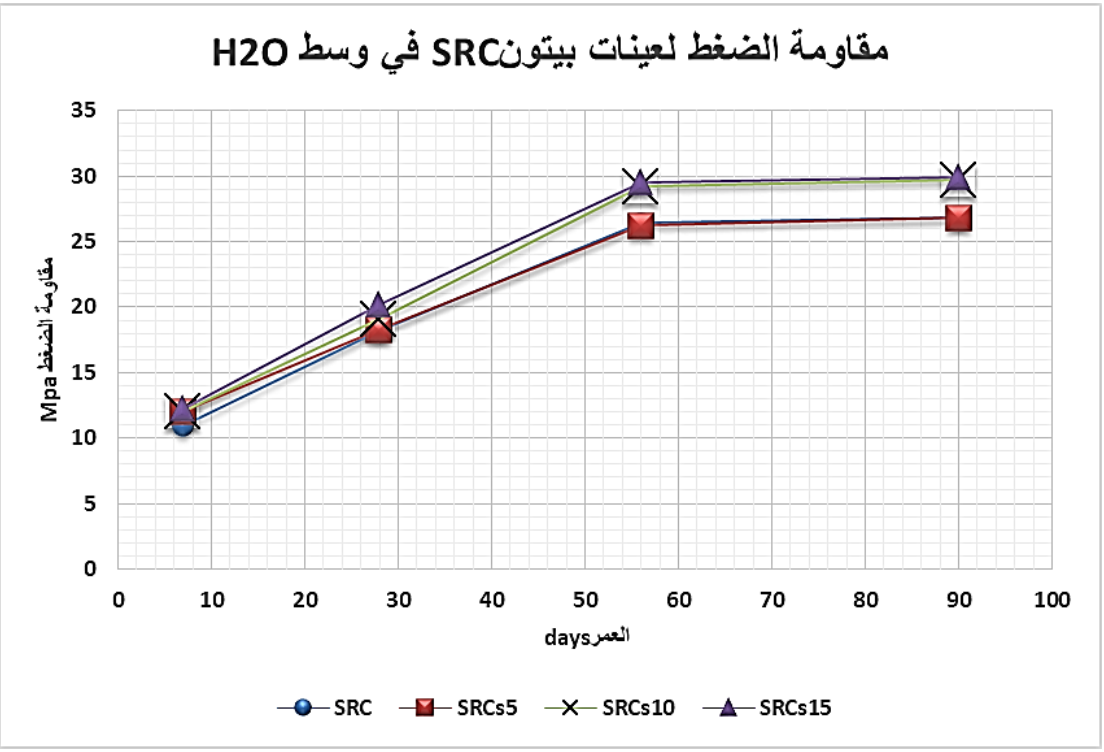
تم إجراء هذه التجربة وفقاً لـ ASTM C39-72 وكانت النتائج كالآتي:

7-1-1- تعيين المقاومة على الضغط للعينات الخرسانية المحفوظة في الماء:

الجدول (10) مقاومة العينات الخرسانية المنتجة على الضغط مع تغير العمر في وسط الحفظ "ماء"

العمر days الخلطة	7	28	56	90
SRC	11 Mpa	18.2 Mpa	26.4 Mpa	26.8 Mpa
SRCs5	12.1 Mpa	18.3 Mpa	26.2 Mpa	26.8 Mpa
SRCs10	12.1 Mpa	19.1 Mpa	29.2 Mpa	29.7 Mpa
SRCs15	12.2 Mpa	20.2 Mpa	29.5 Mpa	29.9 Mpa
الانحراف المعياري	0.568624	0.925563	1.76706	1.733974
التباين	0.323333	0.856667	3.1225	3.006667

وبرسم العلاقة بين المتغيرات السابقة نجد أن:



الشكل (4) المقاومة على الضغط للعينات الخرسانية المحفوظة في الماء كوسط مرجعي.

نلاحظ من الشكل 4السابق وجود قفزة كبيرة في المقاومة بين عمر (28و56)days وهذا يعود للتركيب الكيميائي للإسمنت المقاوم للكبريتات إذ أنه يتأخر في اكتساب المقاومة في بداية العمر المبكر لكنه في الأعمار المتقدمة يحقق المقاومة المطلوبة، كما أن نسب الاستبدال (10–15) % و (0–5) % على التوالي قد حققت نتائج متقاربة إلى حد كبير. كما أن جميع الخلطات تظهر زيادة مطردة في مقاومة الضغط مع تقدم العمر، وهذا متوقع نتيجة استمرار تفاعل الإماهة (Hydration) للإسمنت. تتراوح المقاومة في اليوم الأول بين 11 و14MPa ، وتصل إلى 34–37 MPa عند عمر 90 يوم.

ولكن عند **كل الأعمار**، تتفوق الخلطات التي تحتوي على سيليكا فيوم على الخلطة المرجعية (SRC) من حيث مقاومة الضغط. وتمت ملاحظة أن العلاقة طردية: كلما زادت نسبة السيليكافيوم، زادت المقاومة. الزيادة في المقاومة تعادل تقريبًا **1 MPa** لكل 5% زيادة في محتوى السيليكا، وهذه زيادة ملحوظة علميًا، وقد تعود للأسباب التالية:

1. **التفاعل البوزولاني** :إذا كانت الخلطات البيتونية تحتوي على مواد بوزولانية (مثل السليكا أو الألومينا)، فقد تتفاعل مع هيدروكسيد الكالسيوم الناتج عن إماهة الإسمنت لتكوين مركبات إضافية تزيد من الكثافة والمتانة.
2. **التعبئة الأفضل (Packing Effect):** وجود جزيئات دقيقة من السيليكافيوم قد يؤدي إلى تحسين التدرج الحبيبي وتقليل الفراغات، مما يزيد من مقاومة الضغط.
3. **الامتصاص الداخلي للماء** :قد تمتص السيليكا الماء أثناء الخلط ثم تطلقه لاحقًا، مما يساعد في إماهة الإسمنت بشكل تدريجي (تأثير الخزن الداخلي للماء).

مما سبق يمكن استنتاج أن:

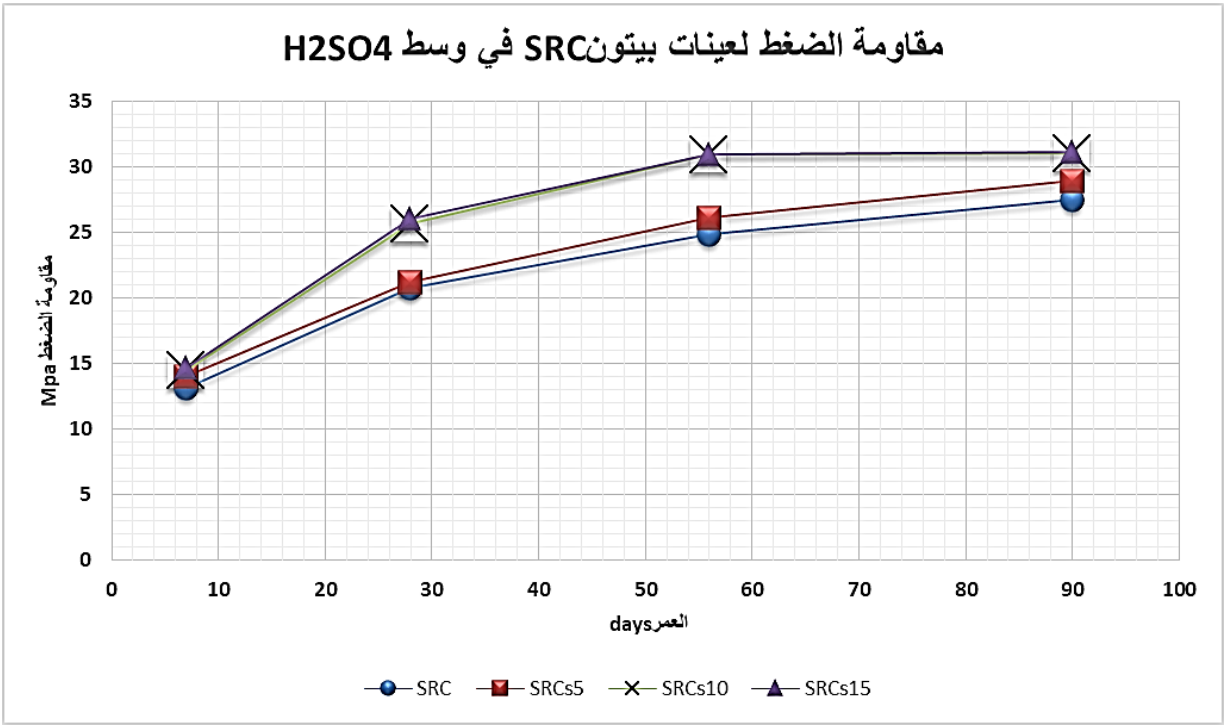
- إضافة السيليكافيوم بنسبة تصل إلى 15% تعمل على تحسين مقاومة الضغط للخرسانة المحفوظة في وسط مرجعي هو الماء.
- الزيادة في المقاومة قد تصل إلى حوالي **3 MPa** عند عمر 90 يوم مقارنة بالخلطة المرجعية.
- هذه النتائج تدعم استخدام السيليكافيوم كبديل جزئي للركام الطبيعي أو كمادة مضافة لتحسين الخواص الميكانيكية، خاصة في الظروف الرطبة.

7-1-2- تعيين المقاومة على الضغط للعينات الخرسانية المحفوظة في وسط حمض الكبريت:

الجدول رقم (11): مقاومة العينات الخرسانية المنتجة على الضغط مع تغير العمر في وسط الحفظ "حمض الكبريت الممدد"

العمر days الخلطة	7	28	56	90
SRC	13.2 Mpa	20.8 Mpa	24.9 Mpa	27.5 Mpa
SRCs5	14.1 Mpa	21.3 Mpa	26.2 Mpa	29 Mpa
SRCs10	14.5 Mpa	25.7 Mpa	31 Mpa	31.1 Mpa
SRCs15	14.7 Mpa	26.1 Mpa	31 Mpa	31.2 Mpa
الانحراف	0.665207	2.812324	3.191003	1.783255
التباين	0.4425	7.909167	10.1825	3.18

وبرسم العلاقة بين المتغيرات السابقة نجد أن:



الشكل (5) المقاومة على الضغط للعينات الخرسانية المحفوظة في وسط حمض الكبريت.

كما يبين الشكل 4 إن التقارب الكبير الذي ظهر بين نسب الاستبدال (0–5) % في الشكل 5 لم يعد واضحاً هنا بل ظهر التباين في المقاومة وهذا يوضح وبشكل كبير أهمية إضافة السيليكافيوم للعينات الخرسانية في اكتساب المقاومة على الضغط في وسط غني بشوارد الكبريتات، ولكن التطابق في قيم المقاومة والذي ظهر في الشكل 4عاد ليظهر مجدداً في الشكل 5 مما يؤكد على أن أفضل نسب استبدال للسيليكا تقع بين (10–15) % من وزن الإسمنت.

تحليل النتائج:

بناءً على سلوك الخرسانة المعروف في أوساط حمض الكبريت، يمكننا استنتاج ما يلي:

أ .تأثير حمض الكبريتيك على الخرسانة:

حمض الكبريتيك يتفاعل مع هيدروكسيد الكالسيوم $(Ca(OH)_2)$الموجود في الخرسانة ليكون جبسًا .(Gypsum)

الجبس يتفاعل لاحقًا مع ألومينات الكالسيوم ليكون إترينجايت (Ettringite)ثانوي، مما يسبب تمددًا وتشققًا.

هذا يؤدي إلى فقدان في الكتلة وانخفاض في مقاومة الضغط بمرور الوقت.

ب .تأثير إضافة السيليكا فيوم:

إن وجود السيليكافيوم قد يحسن مقاومة الخرسانة للهجوم الحمضي لأنها تحتوي على مواد بوزولانية تتفاعل مع الجير لتقليل نسبة $Ca(OH)_2$ القابل للتفاعل في الخلطة الخرسانية.

ج .السلوك المتوقع مع الزمن:

- في الأيام الأولى (0–3 أيام): قد تكون المقاومة متقاربة أو حتى أعلى قليلاً في الخلطات التي تحتوي على سيليكافيوم بسبب التفاعلات المبكرة.

- بعد 5–10 أيام: يبدأ التدهور الواضح، وقد تكون الخلطة المرجعية الأكثر تأثرًا، بينما الخلطات التي تحتوي على سيليكافيوم قد تظهر مقاومة أفضل للتدهور في المقاومة.

يعود الفضل في مقاومة الهجوم الحمضي إلى:

1. **انخفاض محتوى الجير الحر:**
   - التفاعلات البوزولانية للسيليكافيوم تستهلك الجير، مما يقلل من المادة القابلة للتفاعل مع الحمض.
2. **تحسين البنية المسامية:**
   - وجود جزيئات دقيقة من السيليكافيوم قد يقلل من النفاذية، مما يحد من اختراق الحمض إلى داخل الخرسانة.
3. **تأثير الاكتناز:**
   - تحسين التعبئة الحبيبية يقلل من الفراغات، وبالتالي يقلل من مساحة السطح المعرضة للهجوم.

نستنتج مما سبق:

- إضافة السيليكافيوم بنسبة 15% تحسن مقاومة الخرسانة للهجوم بحمض الكبريت.
- الاحتفاظ بالمقاومة يكون بسبب تحسن الخواص الميكروبنائية وانخفاض محتوى الجير الحر.
- هذه النتائج تشجع على استخدام السليكافيوم في الخلطات الخرسانية في بيئات معرضة للهجوم الحمضي، مثل شبكات الصرف الصحي أو المنشآت الصناعية.

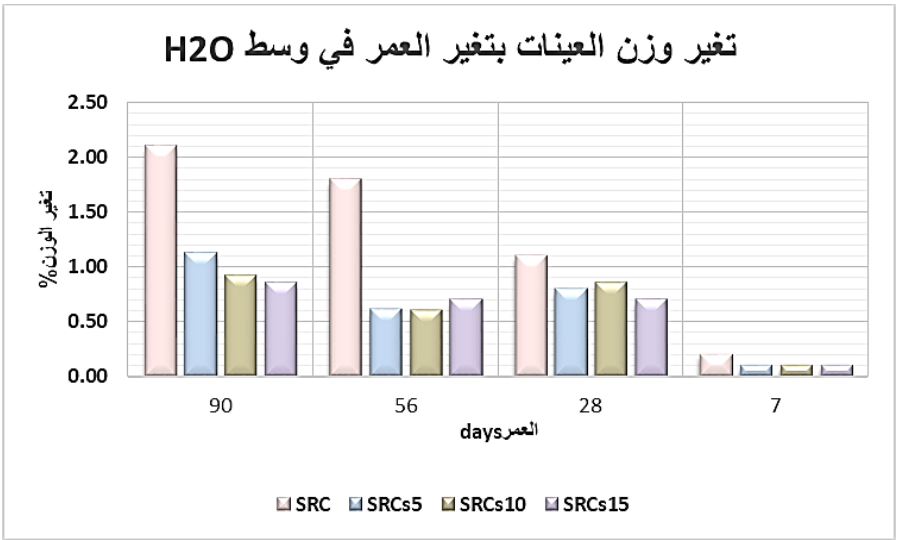
كما تم دراسة التغير الوزني للعينات الناتجة بعد إخراج العينات من أوساط الحفظ ووضعها في جو المخبر لمدة 24ساعة تم أخذ قياساتها الوزنية ومن ثم حساب التغير الوزني الحاصل، وكانت النتائج كالآتي:

7-1-3- تعيين تغير وزن العينات الخرسانية المحفوظة في الوسط المرجعي "الماء"

الجدول رقم (12): تغير وزن العينات الخرسانية المنتجة مع تغير العمر في وسط الحفظ المرجعي"ماء"

العمر days / الخلطة	7	28	56	90
SRC	0.020	0.011	0.18	0.21
SRCs5	0.010	0.080	0.062	0.113
SRCs10	0.010	0.086	0.060	0.092
SRCs15	0.010	0.070	0.070	0.085
الانحراف	0.005	0.034471002	0.058160697	0.057902216
التباين	0.000025	0.00118825	0.003382667	0.003352667

برسم العلاقات بين الخلطات الناتجة وعمر العينات:



الشكل رقم (6): تغير وزن العينات بتغير العمر ونسبة الاستبدال في الماء كوسط مرجعي.

نلاحظ أنه لم يحدث تآكل للعينات بل اكتساب في الوزن، كما أن نسبة الاستبدال 15% قد حققت ثباتاً وزنياً أكبر من كل العينات المدروسة وهذا يفسر الدور الكبير الذي تقوم به السيليكافيوم في زيادة اكتناز الخرسانة.

من الشكل السابق تمت ملاحظة:

- جميع العينات تكتسب وزنًا مع الزمن بسبب امتصاص الماء (تشبع المسام).
- الخلطة المرجعية (بدون سيليكافيوم) تسجل أعلى زيادة في الوزن عند كل الأعمار.
- الخلطات التي تحتوي على سيليكافيوم تسجل زيادات أقل في الوزن، وكلما زادت نسبتها، قلت الزيادة.

يمكن تفسير اكتساب الخلطة المرجعية وزنًا أكثر:

- الخلطة المرجعية قد تكون أكثر مسامية، مما يسمح بامتصاص كمية أكبر من الماء.
- عدم وجود سيلكافيوم يعني عدم وجود مواد مالئة دقيقة تقلل الفراغات.

الخلطات المحتوية على سيليكافيوم تكتسب وزنًا أقل بسبب:

- **تحسين البنية المسامية** :وجود السيليكافيوم الناعمة جداً قد يؤدي إلى:
  - تعبئة أفضل للفراغات بين حبيبات الإسمنت.
  - تكوين هيدرات إضافية (تفاعل بوزولاني) تسد المسام.
- **انخفاض النفاذية** :وبالتالي تقل كمية الماء الممتصة.

كما تمت ملاحظة انخفاض في الوزن عند عمر 56 يومًا للخلطات المحتوية على سيليكافيوم:

هذه ظاهرة مهمة جدًا وقد تعود إلى:

1. **استمرار التفاعلات البوزولانية** :استهلاك الماء في تفاعلات كيميائية إضافية (تشكيل C–S–H إضافي) قد يقلل من الماء الحر داخل المسام.
2. **انكماش ذاتي :(Autogenous Shrinkage)** قد يحدث فقدان طفيف في الوزن نتيجة استهلاك الماء في التفاعلات الداخلية دون تعويض كافٍ من الوسط المحيط.

3. **نضح المواد القابلة للذوبان** :في هذه المرحلة، قد تبدأ بعض المواد القابلة للذوبان في الخلطات التي تحوي سيليكافيوم بالانحلال والخروج من العينة، مما يقلل الوزن الكلي.

يمكن استنتاج أن:

1. **إضافة السيليكافيوم تقلل من امتصاص الماء** في الخرسانة المحفوظة في الماء.
2. **العلاقة طردية** :كلما زادت نسبة السيليكافيوم، قل تغير الوزن (أي قلت المسامية المفتوحة).
3. **الخلطة المرجعية** هي الأكثر تأثرًا بامتصاص الماء، مما يعني أنها قد تكون أقل متانة في البيئات الرطبة على المدى الطويل.
4. **السلوك غير الخطي للخلطات المحتوية على SRCs** (انخفاض الوزن عند 56 يومًا) قد يكون مؤشرًا على تفاعلات داخلية إيجابية (استمرار الإماهة).

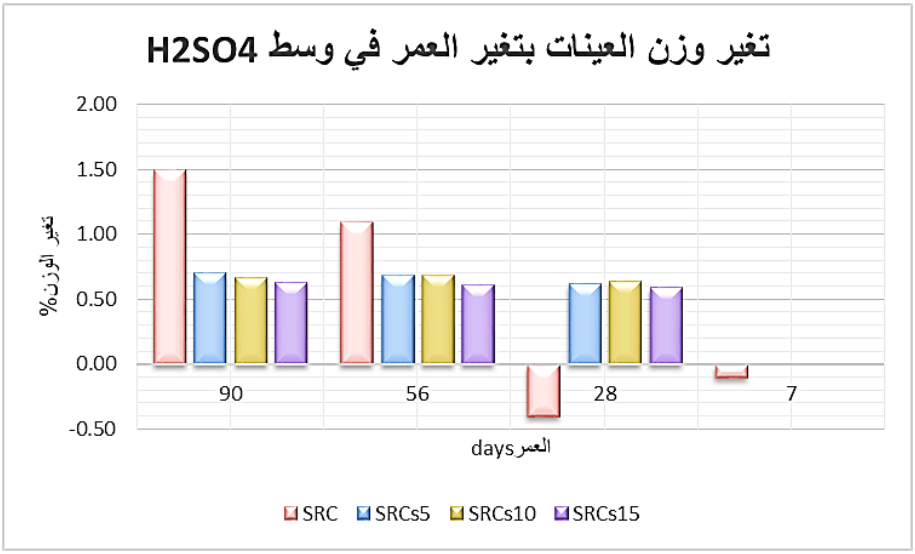
إن استخدام السيليكافيوم قد أدى إلى:

- تحسين متانة الخرسانة في البيئات الرطبة وبالتالي يمكن استخدامها كبديل جزئي في (السدود، الأساسات، المنشآت المائية).
- إمكانية استخدام السيليكافيوم كبديل جزئي للإسمنت أو الركام لتحسين الخواص الميكروبنائية، وبالتالي تقليل مخاطر التفاعلات القلوية أو التمدد الضار المرتبط بامتصاص الماء.

7-1-4- تعيين تغير وزن العينات الخرسانية المحفوظة في الوسط المعدل "حمض الكبريت الممدد":

الجدول رقم (13) تغير وزن العينات الخرسانية المنتجة مع تغير العمر في وسط الحفظ "حمض الكبريت الممدد"

العمر days / الخلطة	7	28	56	90
SRC	-0.010	-0.040	0.11	0.15
SRCs5	0.00	0.062	0.069	0.071
SRCs10	0.00	0.064	0.069	0.067
SRCs15	0.00	0.060	0.061	0.063
الانحراف	0.005	0.051026137	0.022156639	0.041628316
التباين	0.000025	0.002603667	0.000490917	0.001732917



الشكل رقم (7): تغير وزن العينات بتغير العمر ونسبة الاستبدال في وسط حمض الكبريت المدروس.

من الشكل 7 السابق نجد حدوث تآكل في بنية المكعبات الخرسانية غير الحاوية في تركيبها على سيليكا فيوم مما يدل على وجود تآكل من النوع الأول[3] . لم يتم ملاحظة هذا اتآكل في العينات الأخرى مما يدل على دور وأهمية السيليكا في منع تآكل البنية الخرسانية ونزوح مكوناتها خارج العناصر الخرسانية. كما أن نسبة الاستبدال 15% أبدت أكبر ثبات وزني فيما يتعلق بتغير الوزن على الرغم من النتائج المتقاربة لنسب الاستبدال الأخرى.

قراءة في المخطط الناتج:

- جميع العينات **تفقد وزنًا** مع الزمن، وهذا متوقع في وسط حمض الكبريت.
- الخلطة المرجعية تسجل **أعلى فقدان في الوزن** عند كل الأعمار.
- الخلطات التي تحتوي على سيليكافيوم تسجل **فقدانًا أقل** في الوزن، وكلما زادت نسبة السيليكافيوم، قل الفقدان.
- الترتيب النهائي من الأكثر تضررًا إلى الأقل: **SRCs15 > SRCs10 > SRCs5 >** SRC

يمكن تفسير هذا السلوك بأن حمض الكبريت يهاجم الخرسانة عبر آليتين رئيسيتين:

1. **تفاعل الحمض مع هيدروكسيد الكالسيوم:**

$$H2SO4+Ca(OH)2\rightarrow CaSO4\cdot 2H2O$$

الجبس الناتج قد يذوب أو يتساقط من سطح العينات. (ممكن أن تتقشر العينات أو أن يحث انسلاخ للطبقة السطحية)

2. **تفاعل الجبس مع ألومينات الكالسيوم** لتكوين الإترينجيت:

$$3CaSO4+3CaO\cdot Al2O3+32H2O\rightarrow 3CaO\cdot Al2O3\cdot 3CaSO4\cdot 32H2O3CaSO4$$

هذا المركب يتمدد وقد يسبب تشققًا وتفتتًا، مما يزيد من فقدان الوزن.

وبالتالي الخلطات المحتوية على سيليكافيوم أفضل من غير الحاوية عليها بسبب:

1. **انخفاض محتوى الجير الحر: ($Ca(OH)_2$)** لأن التفاعلات البوزولانية للسيليكافيوم تستهلك الجير، مما يقلل من المادة القابلة للتفاعل مع الحمض.

2. **تحسين البنية المسامية:**
   - وجود السيليكافيوم يقلل النفاذية، مما يحد من اختراق الحمض إلى عمق العينة.
   - التآكل يبقى سطحيًا، مما يبطئ فقدان الوزن.
3. **تأثير الحشو والمتانة الذاتية:**
   - جزيئات السيليكافيوم الدقيقة قد تعمل كحاجز فيزيائي يحد من انتشار المنتجات الضارة.

لماذا العلاقة طردية بين نسبة SRCs والمقاومة؟

- كلما زادت نسبةSRCs ، زاد التأثير البوزولاني، وانخفض الجير الحر، وتحسن هيكل المسامات، مما يعزز المقاومة للهجوم الحمضي.

6-نفاذية الماء:

من المعروف أنه للسيطرة على قدرة الخرسانة على التحمل وزيادة ديمومتها، تُحدّد معظم المواصفات متطلبات معينة من حيث مكونات الخرسانة ونسبها، إلاّ إن عدداً من الباحثين يعدّ أن هذه الطريقة لا تؤدي بالضرورة إلى زيادة قدرة الخرسانة على التحمل، وإن هناك حاجة لتطوير معايير أداء أخرى تسمح بتقدير قدرة الخرسانة المتصلبة على التحمل وذلك لكل خلطة خرسانية على حده وكذلك للمنشآت الخرسانية القائمة ولذلك، فإن مقاومة الخرسانة لنفاذية المواد العدائية كأملاح الكلوريدات و الكبريتات وغاز ثاني أكسيد الكربون، هي التي تحدد مدى قدرة الخرسانة على التحمل والديمومة، ولابد من استخدام نفاذية الخرسانة كمعيار لقياس جودتها[7] وقد أصبحت اختبارات النفاذية خاصة تلك التي تشمل قياس نفاذية الماء تستخدم باطراد لتقييم ديمومة الخرسانة وتحديد مدى مواءمتها للمواصفات، خاصة الخرسانة المعرضة لبيئة قاسية. وللعلم، فإن استخدام غبار السيليكا في هذا الإطار ناتج عن الأثر الفعال لاستخدام هذه المادة في تحسين ديمومة الخرسانة وزيادة مقاومتها لصدأ حديد التسليح، وخاصة أن استخدام هذه المواد قد أصبح جزءاً من المستلزمات التي يتطلبها أي كود بناء في البيئات القاسية.**[7]**

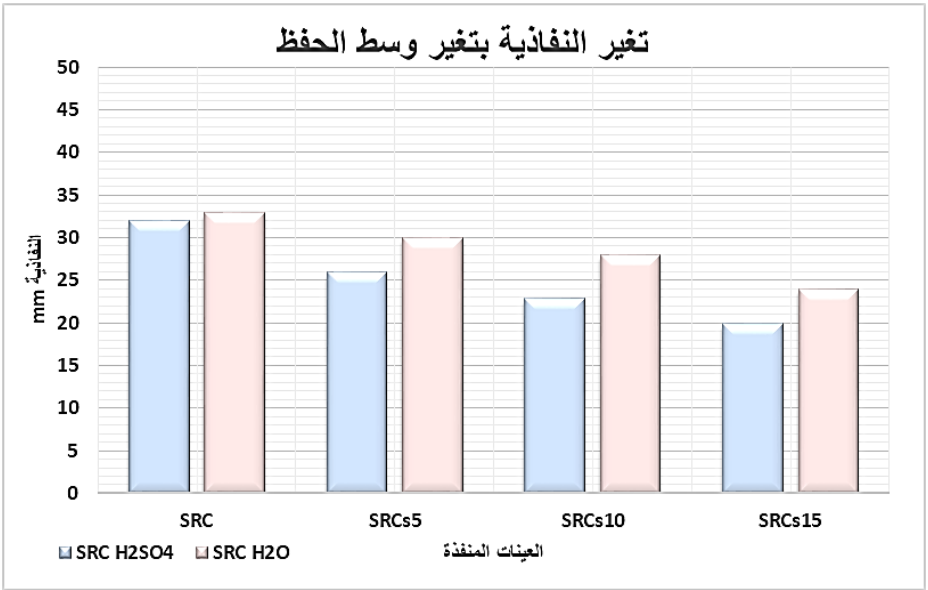
وقد حددت جمعية الخرسانة البريطانية **[8]** كيفية تقييم نفاذية الخرسانة باستخدام هذا الاختبار، كما هو موضح في الجدول الآتي:

الجدول رقم (14): تقييم نفاذية الخرسانة بناءً على اختبار نفاذية الماء .[8]

تقييم الخرسانة	عمق اختراق الماء
منخفضة النفاذية	أقل من 30mm
متوسطة النفاذية	(30-60)mm
مرتفعة النفاذية	أكثر من 60mm

الجدول رقم (15): تغير نفاذية العينات الخرسانية المنتجة بتغير الخلطة المعتمدة ووسط الحفظ

الخلطة	النفاذية في الوسط المرجعي "الماء" mm	النفاذية في وسط حمض الكبريت الممدد mm
SRC	33	32
SRCs5	30	26
SRCs10	28	23
SRCs15	24	20



الشكل رقم (8) تغير نفاذية العينات بتغير نسبة الاستبدال في الأوساط المدروسة.

من الشكل 8 السابق نجد أن نسبة الاستبدال 15% كانت أقل العينات نفاذية في وسط حمض الكبريت وكذلك في الماء ووفقاً للجدول 11 تصنف نفاذية العينات الخرسانية الحاوية عليها بأنها منخفضة النفاذية وكما أعطت هذه النسبة أقل تغير وزني بين العينات المدروسة فإنها بالتالي تعطي مؤشراً واضحاً على أنها أفضل نسبة استبدال للحصول على خرسانة ذات مقاومة عالية على الضغط والتغير الوزني والنفاذية.

8-الاستنتاجات:

- الخلطات المحتوية على سيليكافيوم كانت تكتسب وزنًا أقل.
- في وسطH_2SO_4 ، الخلطات المحتوية على سيليكافيوم تفقد وزنًا أقل.

إن وجود السيليكافيوم يحسن الخواص الميكروبنائية للخرسانة (يقلل النفاذية) وبالتالي يحسن الأداء في كل من البيئات الرطبة والحمضية، لكن بآليات مختلفة:

- في الماء: تقليل امتصاص الماء.
- في الحمض: تقليل التآكل وفقدان الوزن.

يمكن استنتاج أن:

1. **إضافة السيليكافيوم تحسن مقاومة الخرسانة للهجوم بحمض الكبريتيك.**
2. **العلاقة طردية بين نسبة السيليكافيوم والمقاومة وكانت الخلطة** SRCs15 هي الأفضل أداءً.
3. **الخلطة المرجعية** هي الأكثر تضررًا، مما يعني أنها غير مناسبة للبيئات الحمضية.
4. **فقدان الوزن يتسارع مع الزمن**، خاصة بعد 28 يومًا، مما يشير إلى أهمية الحماية المبكرة.
5. **النتائج متسقة مع الفهم العلمي** لتأثير السليكافيوم في تحسين متانة الخرسانة.

وبالتالي: يُعد استخدام السيليكافيوم أمرًا حيويًا في المشاريع التي تتطلب متانة عالية للخرسانة، لا سيما في البيئات البحرية، أو المناطق الصناعية التي تتعرض لانبعاثات كيميائية، أو الأنفاق وشبكات الصرف الصحي المعرضة لحمض الكبريت الناتج عن تحلل الكبريتيد. عند استخدام السيليكا فيوم، يجب مراعاة نسبة الاستبدال المثلى والتي غالبًا ما تتراوح حول 10–15% من وزن الإسمنت لتحقيق أقصى استفادة.

9-التوصيات:

1-يمثل السيليكافيوم إضافة قيمة وفعالة للغاية في مجال هندسة الخرسانة، خاصة عند التعامل مع المنشآت المعرضة لبيئات غنية بالكبريتات وحمض الكبريت. تُسهم خصائصه الفريدة في تحويل الخرسانة العادية إلى مادة أكثر متانة ومقاومة للتآكل، مما يضمن عمرًا افتراضيًا أطول للمنشآت ويقلل من تكاليف الصيانة على المدى الطويل. إن فهم آليات عمله وتطبيقه بالنسب الصحيحة يعد خطوة حاسمة نحو بناء هياكل خرسانية أكثر ديمومة وقوة في وجه التحديات البيئية القاسية.

2-تساعد السيليكا فيوم في تحسين الجودة العامة للخرسانة من خلال زيادة تماسكها وتقليل تأثير دورات التجميد والذوبان، مما يجعلها مثالية للبنى التحتية في المناطق ذات التعرض العالي للأحماض. ومع ذلك، يجب ضبط كمية الإضافة بعناية لتجنب أي تأثيرات سلبية محتملة على الخلطة.

3-ضرورة إجراء أبحاث مستمرة ضمن مجال تكنولوجيا الخرسانة كون هذه المادة حية وقابلة للتعديل بشكل كبير بعد التطور الهائل الذي شهده قطاع مواد البناء وكيماويات الخرسانة وضرورة متابعة العمل المخبري واستخدام الإضافات التي تم العمل عليها من إنتاج شركات وتصنيفات مختلفة.

4-يأتي هذا العمل ضمن سلسلة من الأبحاث تتضمن دراسة أنواع مختلفة من الإسمنت والإضافات الخرسانية وأوساط حفظ متعددة يتم العمل عليها حالياً.

5- من خلال المتغيرات الإحصائية(الانحراف المعياري ومعامل التباين) تم ملاحظة قيم صغيرة جداً لهما مما يدل على تشتت أقل وبالتالي مصداقية أعلى للنتائج التي تم الحصول عليها.

10-المراجع:

1-الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة 2004. نقابة المهندسين، دمشق.

2-**Professor R N Swamy** *Design for Durability-A Holistic Approach*-University of Sheffield, England.

3- **ACI 234R-96** "Guide for the Use of Silica Fume in Concrete".2005

4- **ACI 116R-90** "Cement and Concrete Terminology".2019

5- **ACI Education** "Chemical Admixtures for Concrete".2014

6-The Arabian Journal for Science and Engineering, vol.31.2010

8-Mehta، P.K.، and D.Manmohan, *Proceedings of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cement*. New Delhi 1992

9-الجمهورية العربية السورية، وزارة الأشغال العامة، الشركة العامة للدراسات المائية الجمهورية العربية السورية، وزارة الري، الهيئة العامة للموارد المائية، مشروع دراسة الموازنة المائية لحوض الساحل 2013، التحاليل الكيميائية الكاملة للنقاط المائية.

10-Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

11-Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (1996). *Pozzolanic and Cementitious Materials*. Gordon and Breach Publishers.

12-Allahverdi, A., & Škvára, F. (2000). *Nitric acid attack on hardened paste of geopolymeric cements*

13-Al-Dulajjan, S. U., et al. (2003). *Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate*. Cement and Concrete Composites, 25(4-5), 429-437.

14-Hewayde, E., et al. (2007). *Effect of mixture design parameters and wetting–drying cycles on resistance of concrete to sulfuric acid attack*. Journal of Materials in Civil Engineering, 19(2), 155-163.

15-Bassuoni, M. T., & Nehdi, M. L. (2007). *Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction*. Cement and Concrete Research, 37(7), 1070-1084.

16-Khan, M. I., & Siddique, R. (2011). *Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties*. Resources, Conservation and Recycling, 57, 30-35.

17-Siddique, R., & Khan, M. I. (2011). *Supplementary Cementing Materials*. Springer.

18-Thomas, M. D. A., et al. (1999). *The effect of supplementary cementing materials on the permeability of chloride and sulfate ions in concrete*.

19-ASTM C1240 - Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures.

20-ACI 234R - Guide for the Use of Silica Fume in Concrete.

21-ASTM C267 - Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacings.