



دراسة مرجعية عن تأثير دورات الجفاف والرطوبة على تلف الخرسانة المعرضة لكبريتات الصوديوم

نوري محمد الباشا صفاء الطاهر عبدالسميع

قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة صبراتة، ليبيا

nuri.elbasha@sabu.edu.ly

تاريخ الاستلام: 2025/8/12 - تاريخ المراجعة: 2025/9/11 - تاريخ القبول: 2025/9/16 - تاريخ النشر: 2025/9/23

الملخص:

تعد مشكلة تلف الخرسانة بسبب التفاعل مع كبريتات الصوديوم من القضايا الهامة في الهندسة الإنشائية، خاصة في المناطق التي تتعرض لتقلبات مناخية حادة، يعتبر تأثير دورات الجفاف والرطوبة من العوامل الرئيسية التي تسهم في زيادة تأثير هذا التفاعل، حيث تتسبب هذه الدورات في تشققات داخل الخرسانة نتيجة للتغيرات المستمرة في حجمها بسبب التمدد والانكماش الناتج عن امتصاص الماء وتبخره، حيث تتفاعل كبريتات الصوديوم مع هيدروكسيد الكالسيوم في الخرسانة مكوناً هيدرات الكبريتات؛ مما يؤدي إلى زيادة حجم المادة المنتجة وتسبب في تمدد الخرسانة وتشققاتها، هذا التفاعل يصبح أكثر حدة في ظروف دورات الجفاف والرطوبة؛ حيث أن هذه الدورات تسهل امتصاص الماء مرة أخرى في الخرسانة، مما يعزز التفاعل مع كبريتات الصوديوم ويزيد من تدهور الخرسانة.

تهدف هذه الدراسة المرجعية الى دراسة تأثير العوامل البيئية مثل التغيرات بين الجفاف والرطوبة على متانة الخرسانة، بالإضافة إلى تأثير تفاعل الخرسانة مع كبريتات الصوديوم، حيث يمكن أن تتفاعل مع مكونات الخرسانة، مما يؤدي إلى تدهورها أو تآكلها. تكمن أهمية هذا في فهم كيفية تأثير كبريتات الصوديوم على الهيكل الخرساني، خاصة في البيئات التي تحتوي على تركيزات عالية من كبريتات الصوديوم.

خلصت الدراسة إلى أن استخدام مواد وتقنيات معززة للمتانة يمكن أن يساعد في تقليل تأثيرات تفاعل كبريتات الصوديوم وضمان استدامة الخرسانة في هذه البيئات، كاستبدال الجزئي للأسمنت البورتلاندي بالرماد المتطاير حيث يمكن للكمية المناسبة من الرماد المتطاير أن تحسن بشكل فعال البنية الداخلية للخرسانة لتقليل أضرار التآكل وخفض نسبة ماء الخلط يمكن أن تحسن من مقاومة الخرسانة لهجوم كبريتات الصوديوم كما أن زيادة فترة الدورة الجافة والرطبة تؤدي تدريجياً إلى زيادة عمق تأثير هجوم الكبريتات داخل الخرسانة، وبالتالي يجب أن يؤخذ في الاعتبار تأثير دورات الجفاف والرطوبة عند تصميم الهياكل الخرسانية في بيئات معرضة لتقلبات مناخية.

الكلمات الدالة: كبريتات الصوديوم، دورات الجفاف-الرطوبة، التآكل، هجوم الكبريتات.

Abstract:

The problem of concrete damage due to interaction with sodium sulfate is one of the important issues in structural engineering, especially in areas that are exposed to severe climate fluctuations. The effect of drought and humidity cycles is one of the main factors that contribute to increasing the effect of this reaction, as these cycles cause cracks inside the concrete as a result. Due to continuous changes in size due to expansion and contraction resulting from the absorption and evaporation of water, Where sodium sulfate reacts with calcium hydroxide in concrete, forming sulfate hydrate, which leads to an increase in the volume of the produced material and causes the concrete to expand and crack. This reaction becomes more severe in conditions of dry and wet cycles, as these cycles facilitate the absorption of water again into the concrete, which It enhances the reaction with sodium sulphate and increases the deterioration of concrete.

This reference study aims to study the effect of environmental factors such as changes between dryness and humidity on the durability of concrete, in addition to the effect of concrete's interaction with sodium sulfate, as it can interact with concrete components, leading to its deterioration or corrosion. The importance of this is to understand how sodium sulfate affects the concrete structure, especially in environments containing high concentrations of sodium sulfate.

The study concluded that the use of materials and techniques that enhance durability can help reduce the effects of the sodium sulfate reaction and ensure the sustainability of concrete in these environments, such as partially replacing Portland cement with fly ash, where the appropriate amount of fly ash can effectively improve the internal structure of concrete to reduce corrosion damage and reduce the rate of Mixing water can improve the resistance of concrete to sodium sulphate attack. Increasing the period of the dry and wet cycle gradually leads to an increase in the depth of the effect of sulfate attack within the concrete, and therefore the effect of dry and wet cycles must be taken into account when designing concrete structures in environments exposed to climate fluctuations.

Key Words: sodium sulphate, Dry-wet cycles, Corrosion, sulfate attack

1- المقدمة

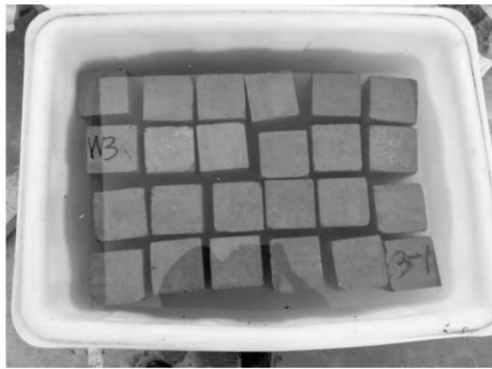
في البيئات التي تشهد دورات جافة ورطبة، مثل تلك المعرضة للرذاذ والمد والجزر، يكون هجوم الكبريتات على الخرسانة معقدًا للغاية. حيث حازت دورات الجفاف والرطوبة على اهتمام الباحث نظرًا لأنها تسبب في وصول كبريتات الصوديوم إلى السطح الخرساني، أثناء العملية الرطبة يخترق أيون الكبريتات (SO_4^{2-}) الخرسانة تدريجيًا من خلال الشقوق الدقيقة والمسام. أثناء العملية الجافة يتبخر الماء بسرعة ويزداد تركيز أيونات كبريتات الصوديوم (SO_4^{2-}) في المسام الخرسانية تدريجيًا وعلى السطح الخرساني، بينما تتبلور كبريتات الصوديوم (Na_2SO_4) على السطح الخرساني [1]. يتفاعل (SO_4^{2-}) مع منتجات ترطيب الأسمنت مما يزيد من معدل التمدد والشقوق، ويؤدي ذلك في النهاية إلى تسريع تدهور الخرسانة [2]. ولكن تم اعتبار معظم عوامل الدورة الجافة والرطوبة بمثابة ظروف تدهور وليست موضوعات للبحث. ومع ذلك، فإن العوامل مثل فترة الدورة الجافة والرطوبة لها تأثير كبير على تدهور الخرسانة تحت هجوم كبريتات الصوديوم. حتى الآن، الدراسات حول تأثير فترة الدورة الجافة والرطوبة على أداء الخرسانة على المدى الطويل لا تكفي لوضع معيار موحد لنظام الدورة الجافة والرطوبة، مما يحث من تطوير وتركيز الأبحاث على الخرسانة تحت هجوم كبريتات الصوديوم.

من المهم أن تُعتبر فترات الدورة الجافة والرطوبة كعامل أساسي في تطوير طريقة فعالة لتطبيق هذه الدورات، وهذا سيسهم في تسهيل الدراسات التجريبية المنهجية التي تركز على تأثير تدهور أداء الخرسانة نتيجة لهجوم الكبريتات في أنظمة الدورة الجافة والرطوبة المتنوعة بالإضافة إلى فهم الآلية التي تكمن وراء ذلك باستخدام فترات زمنية مختلفة لهذه الدورات [2, 3].

Jun.et.al, (2021)

تم دراسة تأثير فترات الدورة الجافة والترطيب على تآكل الخرسانة المعرضة لهجوم كبريتات الصوديوم. تم اختبار العينات الخرسانية حيث كانت نسبة الماء للإسمنت 0.54. تم استخدام مواد رابطة تشمل الأسمنت البورتلاندي العادي PO42.5، والرماد المتطاير (FA). بالإضافة إلى الأسمنت البورتلاندي العادي (OPC) مع إضافة 20% من الرماد المتطاير. تم إعداد العينات بأبعاد $100 \times 100 \times 100$ مم و $100 \times 100 \times 400$ مم تمت أولاً إضافة المادة الأسمنتية والركام الناعم إلى الخلاط بشكل منفصل وخلطهما لمدة دقيقتين تقريبًا؛ ثم يضاف الماء ويخلط بالتساوي. تم صب هذه العينات ومعالجتها في ظروف قياسية لمدة 28 يومًا في غرفة رطبة مع رطوبة نسبية تبلغ 95% ودرجة حرارة ثابتة قدرها 20 درجة مئوية.

تم غمر العينات في صندوق يحتوي على محلول كبريتات الصوديوم 5% كمحلول لإختبار التآكل، في درجة حرارة الغرفة، وأثناء عملية التجفيف تم وضع العينات عموديًا لأعلى في الخارج لتجف بشكل طبيعي، مع الحفاظ على تهوية جيدة كما موضح في الشكل (1)، استخدمت هذه الدراسة أربع فترات مختلفة من الدورات الجافة والرطوبة (3 و 7 و 14 و 21 يومًا)، وثلاث عينات لكل فترة وتم تصنيف العينات على أنها T3 و T7 و T14 و T21. يتم تحديث محلول Na_2SO_4 كل 30 يومًا للحفاظ على تركيز المحلول ثابتًا.



(a) Wetting process



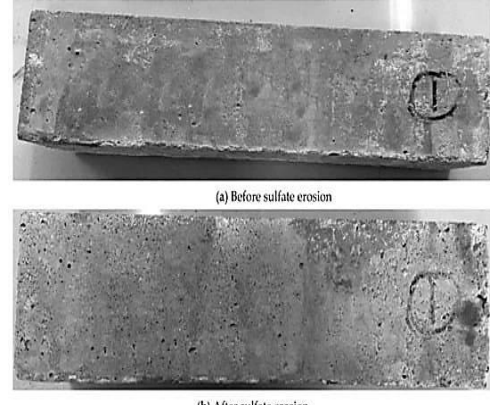
(b) Drying process

الشكل (1): (a) عملية الترطيب (b) عملية التجفيف [4]

لاحظوا أن أثناء عملية الترطيب، تدخل الكبريتات إلى العينة، وفي عملية التجفيف، تظهر بلورات كبريتات الصوديوم في مسام العينة وسطحها كما موضح في الشكل (2) و (3). أيضا وجدوا أن زيادة فترة الدورة الجافة والرطبة تؤدي تدريجياً إلى زيادة عمق تأثير هجوم الكبريتات داخل الخرسانة. ومع ذلك، خلال فترة معينة من الدورة الجافة والرطبة، انخفض محتوى منتجات التآكل تدريجياً مع زيادة العمق [4].



الشكل (3): بلورات كبريتات الصوديوم في مسام العينات وسطحها [4]

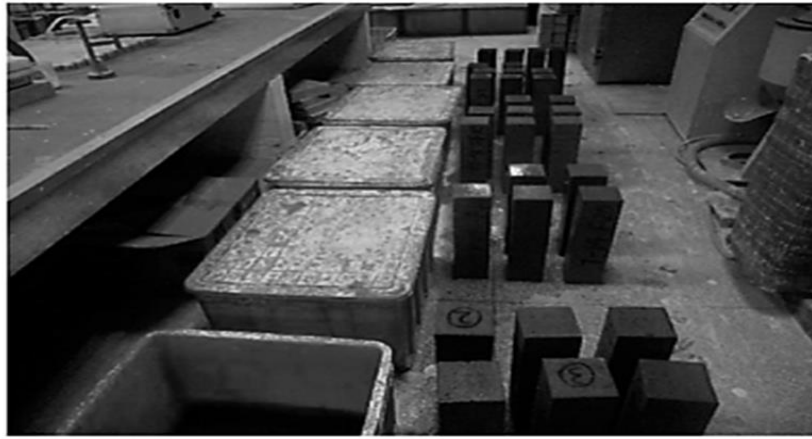


الشكل (2): الفحص البصري للخرسانة بالدورات الجافة والرطبة العينة [4]

Fang.et.al.(2021)

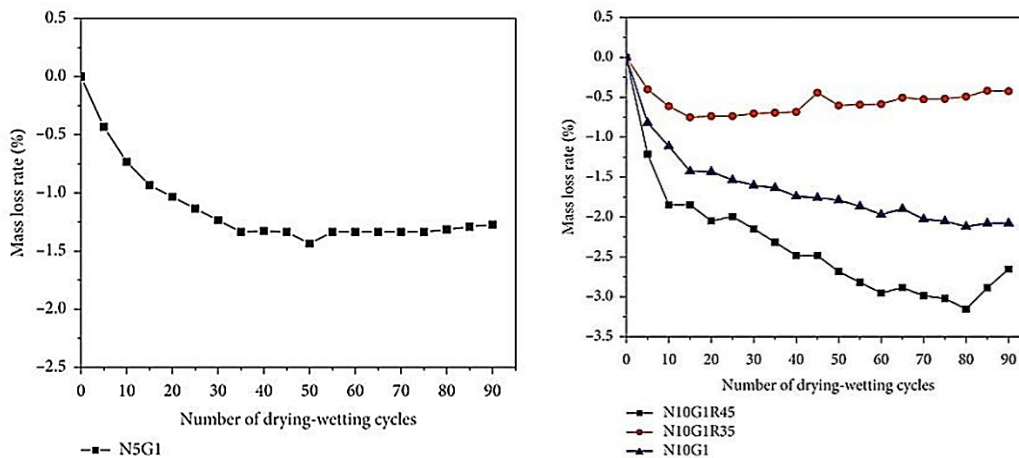
قامو بدراسة تأثير هجوم كبريتات الصوديوم على الخرسانة في ظل دورات التجفيف والترطيب، تم اختبار ثلاث مجموعات من الخلطات الخرسانية حيث كانت نسبة الماء للإسمنت كالتالي (0.45, 0.40, 0.35)، في كل مجموعة تم استخدام ثلاثة أنواع من المواد الرابطة: الأسمنت البورتلاندي العادي، OPC مع 30% رماد المتطاير نوع F، OPC مع 50% رماد المتطاير نوع F، واستخدمو كبريتات الصوديوم بتركيز 5% و 10%، وتم تحضير عينات منشورية بحجم 100 مم × 100 مم × 400 مم للاختبار. تم تجفيف العينات التي قامو بتحضيرها عند درجة حرارة 60 درجة مئوية لمدة 24 ساعة قبل إجراء الاختبار وفقاً لنظام دورة التجفيف والترطيب حيث تم استخدام نظامين لدورة التجفيف والترطيب يختلف كل نظام عن الآخر في مدة الغمر ومدة التجفيف، حيث يرمز للنظام الأول برمز G1: والذي تم فيه غمر العينات المجففة في محلول كبريتات الصوديوم لمدة 10 ساعات تليها التجفيف لمدة ساعة واحدة في درجة حرارة الغرفة، ثم نُوضع في الفرن على درجة حرارة 60 درجة مئوية لمدة 36 ساعة، وأخيراً يتم تبريده لمدة ساعة واحدة في الهواء.

أما النظام الثاني ويرمز له بالرمز G2: فتم فيه غمر العينات المجففة في محلول كبريتات الصوديوم لمدة 23 ساعة، تليها التجفيف لمدة ساعة واحدة في درجة حرارة الغرفة، ثم نُوضع في الفرن على درجة حرارة 60 درجة مئوية لمدة 23 ساعة، وأخيراً يتم تبريده لمدة ساعة واحدة في الهواء، مع تجديد محلول كبريتات الصوديوم داخل الحاويات المعدة للاختبار كل 20 يوم كما في الشكل (4).



الشكل (4): العينات التي سيتم غمرها داخل الحاويات المحتوية على كبريتات الصوديوم [5]

وجدو أن الخرسانة التي تحتوي على نسبة عالية من الماء تعمل على تسريع انتشار أيونات الكبريتات في الحالة الرطبة. في الحالة الجافة، نظرًا للتوصيل الأفضل بين المسام، يكون تحقيق ظروف التبلور أسهل، مما يسرع عملية تلف الخرسانة وتدهورها كما هو موضح في الشكل (5). وتحت تأثير Na_2SO_4 عالي التركيز مما يدل على أن المحلول عالي التركيز يسرع التفاعل الكيميائي بين أيونات الكبريتات ومنتجات ترطيب الأسمنت مع زيادة دورات الجفاف والترطيب كما هو موضح في الشكل (6). وإن دمج كمية مناسبة من الرماد المتطاير يمكن أن يحسن بشكل فعال من مقاومة الخرسانة لهجوم الكبريتات في ظل دورات التجفيف والترطيب [6], [7].



الشكل (6): نسبة الضرر عند تركيز 5٪

(كبريتات الصوديوم) [5]

الشكل (5): تباين الضرر للخرسانة مع نسب مختلفة

من رابط الماء وتركيز 10% [5]

تشير هذه الدراسة إلى نموذج توزيع ويبل متعدد المتغيرات للتنبؤ بعمر الخرسانة الذي وضعه [6] وفقاً للوضع الفعلي لتلف الخرسانة. يتم استخدام المعادلة التالية لتناسب البيانات التجريبية:

$$E(D) = N^{-2} \sum_{i=0}^{\left\{\left(\frac{N}{2}\right)-1\right\}} 4(N-2i-1) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\lambda_i \left(0.001m - k_0 \lambda_i^{-1} \right)^{+} \right)^{\alpha} \right] \right\} \quad (1)$$

حيث N هو الكسر المتساوي المحسوب على كل جانب من القسم ويتم أخذه كرقم زوجي، m هو عدد دورات التجفيف والترطيب المرتبطة بالمقياس الزمني، k_0 هو الثابت النسبي غير المحدد، و α و λ هما عامل الشكل وعامل الحجم لتوزيع Weibull، على التوالي. المنخفض "+" تعني أنه عندما تكون القيمة بين القوسين سالبة، يتم أخذ القيمة على أنها 0؛ خلاف ذلك، القيمة لم تتغير بافتراض أن عامل القياس يتغير بشكل غير خطي على طول المقطع العرضي، يظهر عامل مقياس الطبقة λ كما يلي:

$$\lambda_i = \lambda_0 + v(i + 0.5)^{-1} \quad (2)$$

حيث λ_0 هي عوامل القياس الموحدة التي سيتم تحديدها، v هو عامل التدرج الذي سيتم تحديده، و $i = 0, 1, (N/2 - 1)$.

الجدول 1: العوامل والعمر المتوقع لنموذج التنبؤ لتوزيع Weibull لكل عينة في ظل دورات التجفيف والترطيب وهجوم كبريتات الصوديوم.

Specimen code	α	λ_0	v	R^2	SM
N10G1	2.15919	6.29821	0.77155	0.98299	120.4
N5G1	1.16598	3.85001	0.83759	0.97449	168.8
N10G1R35	2.62586	4.23766	0.98944	0.95	197.9
N10G1R45	2.07062	11.8714	0.01	0.99083	90.5
N10G1F30	2.45974	2.80916	1.07924	0.93117	223.3
N10G1F50	2.99746	2.57182	3.00708	0.95732	211.4
N10G1Y90	1.0639	1.8114	1.41338	0.99921	235
N10G1Y300	2.79334	1.21212	3.62692	0.99351	284.5
N10G2	1.18816	4.38595	1.19739	0.97769	159.5

(1) عامل الشكل α : يعكس خصائص الفشل لكل نقطة داخل الخرسانة. على الرغم من أنه يختلف في ظل ظروف الخدمة المختلفة، الفرق صغير. يتراوح عامل الشكل α من 1.06390 إلى 2.99746، مما يدل على أن شكل منحني الفشل عند كل نقطة في الخرسانة هو نفسه تقريبًا.

(2) عامل القياس λ_0 : يعكس مقاومة الخرسانة للظروف المعاكسة. كلما زاد λ_0 ، قلت مقاومة المادة والعكس صحيح. كما يتبين من الجدول (1)، فإن الفرق في عوامل قياس الخرسانة مع نسب رابطة الماء المختلفة يكون أكثر وضوحًا. عامل المقياس λ_0 لنموذج الضرر للعينة N10G1R35 هو 4.23766، وعامل المقياس λ_0 لنموذج الضرر للعينة N10G1 هو 6.29821. ومع ذلك، فإن عامل مقياس نموذج الضرر للعينة N10G1R45 أكبر، وقيمه 11.87140. ويبين أن مقاومة الخرسانة تقل بشكل ملحوظ مع زيادة نسبة الماء الرابط، وهو ما يتماشى مع الوضع الفعلي. عامل المقياس λ_0 لنموذج الضرر للعينة N10G1Y90 هو 1.81140، وعامل المقياس λ_0 لنموذج الضرر للعينة N10G1Y300 هو 1.21212. كلما زاد وقت المعالجة المبكرة، كلما زادت مقاومة المادة وصغرت λ_0 .

(3) عامل التدرج v : يعكس الفرق في تطور الضرر بين الأجزاء المختلفة من الخرسانة. كلما زاد عامل التدرج، كلما زاد الفرق في تطور الضرر في مواقع مختلفة داخل الخرسانة وضعف تزامن الضرر. عامل التدرج v لنموذج الضرر للعينة N10G1R35 هو 0.98944، وعامل التدرج v لنموذج الضرر للعينة N10G1 هو 0.77155. ومع ذلك، فإن عامل التدرج v لنموذج الضرر للعينة N10G1R45 هو 0.01000 فقط. كلما زادت نسبة رابط الماء، قل تدرج الضرر وزادت سرعة تقدم الضرر المتزامن. عامل التدرج v لنموذج الضرر للعينة N10G1Y90 هو 1.41338، وعامل التدرج v لنموذج الضرر للعينة N10G1Y300 هو 3.62692. كلما زاد وقت المعالجة المبكر، زاد تدرج الضرر وبطأت سرعة تقدم الضرر المتزامن.

يمكن أن نرى من الجدول (1) أن قانون التغيير للقيمة العمرية المتوقعة للخرسانة يتوافق مع تطور الضرر للخرسانة. بالإضافة إلى ذلك، R^2 للعينة N10G1F30 بعد التركيب هو 0.93117، R^2 للعينات الخرسانية الأخرى بعد التركيب بين 0.95000 و 0.99921، ودقة التركيب عالية نسبيًا. في التجربة، درجة الضرر للعينة N10G1R45 هي 0.4046 بعد 90 دورة تجفيف وترطيب، أي يتم الوصول إلى قيمة عمر الخدمة. العمر المتوقع للنموذج هو 90.5 مرة، وهو قريب جدًا من قيمة الاختبار. يوضح

أن نموذج توزيع Weibull يمكنه التنبؤ بدقة بقيمة عمر الخدمة للخرسانة في ظل دورات التجفيف والترطيب وهجوم كبريتات الصوديوم.

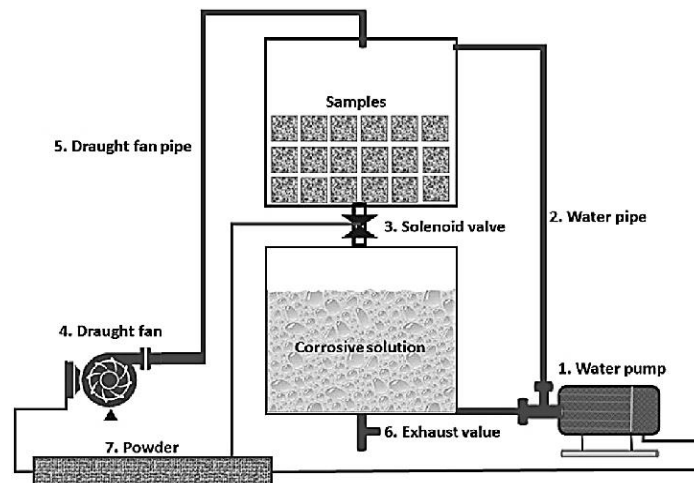
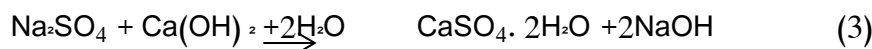
Cheng.et.al. (2020)

تستعرض هذه الدراسة بشكل منهجي تأثير الأيونات الموجودة في مياه البحر على تحلل عجينة الأسمنت البورتلاندي تحت تأثير دورات التجفيف والترطيب. تم تحضير العينات باستخدام خلطة بنسبة ماء إلى أسمنت 0.5 ورمل إلى مادة رابطة وفقاً للمواصفة الأوروبية EN 196-1.

تم تحضير عجينة أسمنتية بأبعاد 40 × 40 × 40 مم باستخدام نفس نسبة الماء إلى الأسمنت، ثم صُبَّت في قوالب. بعد مرور يوم على الصب، تمت إزالة القوالب وغُلِجَت العينات في ظروف درجة حرارة 20 درجة مئوية ورطوبة نسبية 98% لمدة 28 يوماً. بعدها، تم تجفيف العينات عند درجة حرارة 60 درجة مئوية لمدة يومين، ثم تم تغليفها براتنج الإيبوكسي مع ترك الأسطح 40 مم × 40 مم مكشوفة. تم بعد ذلك نقل العينات إلى حاويات بلاستيكية محكمة الغلق وغمرها في محاليل التعرض لمدة 30، 60، 90، و120 يوماً، بالإضافة إلى تعرض العينات لمحلول يحتوي على أيونات متعددة.

تم تصميم أربع غرف اختبار لدورات التجفيف والترطيب، وتم ضبط الدورة كما يلي: غمر العينات في محلول التآكل لمدة 18 ساعة، تليها فترة تجفيف لمدة نصف ساعة في الهواء، ثم تجفيف العينات لمدة 5 ساعات عند درجة حرارة 60 درجة مئوية، وأخيراً تبريدها إلى درجة حرارة الغرفة لمدة نصف ساعة. ويمثل كل دورة تجفيف وترطيب 24 ساعة، وهو ما يشابه الظروف البحرية الحقيقية. للحفاظ على ثبات تركيز الأيونات في المحاليل، تم تجديد المحاليل المكشوفة كل أسبوعين. ومع مرور الوقت قد تزيد تركيزات الأيونات المتعددة نتيجة لدورات التجفيف والترطيب، كما يظهر في الشكل (7)

خلصت الدراسة إلى أن تكون أيونات كبريتات الصوديوم داخل المصفوفة يسبب تشكل الشقوق والمسامات؛ مما يؤدي إلى تفاعلات تؤدي إلى تكون منتجات توسعية مثل الجبس والاترنجيت.



الشكل (7): مخطط الإعداد لتحديد عينات الخط المعرضة لمحاليل التآكل. [6]

هذه المنتجات تسبب زيادة في عدد المسامات والشقوق داخل المادة، ويعتقد أن حجم المسام الكبير والمسامية العالية يعززان من تسريع هجمات الأيونات المسببة للتآكل. كما تم التأكيد على أن العوامل الرئيسية التي يجب أخذها في الاعتبار عند اختبار الدورات الجافة والرطبة هي مدة التجفيف والترطيب، بالإضافة إلى تركيز المحلول المستخدم.

2- مناقشة الدراسات السابقة

عند النظر في الدراسات السابقة، نلاحظ وجود اتفاق واسع على الأثر الضار لدورات الجفاف والترطيب، ولكن مع تباينات واضحة في تفسير آليات التلف والعوامل المؤثرة.

أكدا [26],[32] أن زيادة عدد الدورات يرتبط طرديًا بتفاقم الأضرار. حيث لاحظ [32] انخفاضًا بنسبة 30% في مقاومة الضغط بعد 50 دورة، بينما بين [26] أن المناطق المعرضة للهواء خلال هذه الدورات تعاني من تلف أكبر مقارنة بالمناطق المغمورة، مشيرًا إلى أهمية نسبة الجفاف إلى الرطوبة.

من ناحية أخرى، ناقش [24] أن الخرسانة عالية المقاومة تُظهر أداءً أفضل مبدئيًا. لكنهم أشاروا إلى أن تكرار دورات الجفاف يزيد النفاذية ويضعف الأداء، وهو ما يتفق مع [54] الذين أوضحوا أن إعادة تبلور الأطوار الصلبة يسهم في استمرار التلف.

أما [27] فقد أضافوا بعدًا جديدًا بتجربة الإضافات المعدنية مثل الميكاكولين، حيث وجدوا أن هذه الإضافات تحدّ من التلف حتى بعد 50 دورة، مسجلين انخفاضًا لا يتجاوز 10%، بخلاف ما أشار إليه [13] الذي رأى أن نمو التبلور المتكرر يجعل الهجوم الكبريتي عملية مستمرة يصعب وقفها.

الأبحاث مثل [53] أظهرت أن مدة دورة الجفاف/الرطوبة تؤثر بشكل غير خطي على معدل التدهور، حيث وجدوا أن زيادة مدة الدورة تزيد التلف حتى نقطة حرجة، بعدها يبدأ معدل التدهور بالتراجع.

كما أوضحت دراسة [15] أن نسبة الجفاف إلى الرطوبة تمثل عاملاً حساسًا، حيث سجلوا معدلات تدهور أعلى عند زيادة فترات الجفاف مقارنة بالترطيب، مما يعزز فرضية [26] حول أهمية نسبة التعرض.

بدورهم أظهرها [1] أن التدهور يتسارع بزيادة مدة الدورة الزمنية، مشيرين إلى أن الخرسانة تدخل مرحلة تلف حرجة أسرع كلما طالت الفترات الزمنية للجفاف والترطيب، وهو ما ينسجم مع نتائج [31].

أخيرًا، استعرضت الأبحاث الأحدث [51] التحديات القائمة في تطوير نماذج تنبؤية دقيقة، مؤكدين الحاجة إلى توحيد منهجيات الاختبار بسبب التباين الكبير بين نتائج الدراسات المختلفة، بينما قدم [52] محاكاة رقمية سلطت الضوء على التفاعل المعقد بين الأحمال الخارجية وهجمات الكبريتات خلال هذه الدورات.

الجدول (2) يوضح تنوع الدراسات من حيث عدد الدورات، نسبة الجفاف إلى الرطوبة، نوع الخرسانة، والإضافات المستخدمة. كما يسلط الضوء على النتائج الرئيسية لكل دراسة، مما يساعد في فهم العوامل المؤثرة على تدهور الخرسانة تحت تأثير دورات الجفاف والرطوبة وهجوم الكبريتات.

النتائج الرئيسية	الإضافات	نوع الخرسانة	نسبة الجفاف/الرطوبة	عدد الدورات	السنة	الدراسة
التدهور يزداد مع زيادة مدة الدورة حتى نقطة معينة ثم ينخفض	لا يوجد	عادية	غير محددة	دورات (3، 7، 14، 21، 4 (يومًا)	2019	[31]
انخفاض 10% فقط بفضل الإضافات	ميكاكولين	معدلة بميكاكولين	غير محددة	50	2020	[27]
انخفاض 20%، التأثير غير خطي	لا يوجد	عادية	غير محددة	50	2021	[53]
تلف أكبر في المناطق المعرضة للهواء	لا يوجد	عادية	غير محددة	30	2018	[26]
زيادة النفاذية مع الدورات	لا يوجد	عالية المقاومة	غير محددة	40	2016	[24]
الحاجة لتوحيد طرق الاختبار	لا ينطبق	متنوعة	غير محددة	مراجعة	2024	[51]
نسبة الجفاف/الرطوبة تؤثر بشكل كبير على التدهور	لا يوجد	عادية	إلى 10:1 3:1	غير محددة	2020	[15]
التدهور يتسارع مع زيادة مدة الدورة	لا يوجد	عادية	غير محددة	غير محددة	2020	[1]
انخفاض 30% في مقاومة الضغط بعد 50 دورة	لا يوجد	عادية	غير محددة	50	2020	[12]

3- الخلاصة

أظهرت العديد من الدراسات أن تدهور الخرسانة نتيجة التعرض للأملاح الكبريتية يُعد من أبرز أسباب فشل المنشآت في البيئات العدوانية، لا سيما في المناطق الجافة وشبه الجافة. من بين هذه الأملاح، تُعد كبريتات الصوديوم (Na_2SO_4) ذات تأثير بالغ الخطورة بسبب قابليتها للذوبان العالي وسرعة تفاعلها مع مكونات الخرسانة.

تشير الدراسات السابقة إلى أن آلية التدهور الكبريتي لا تقتصر على التفاعل الكيميائي فقط، بل تتفاقم بشكل ملحوظ عند تكرار دورات الجفاف والرطوبة، حيث تؤدي هذه الدورات إلى تعزيز تغلغل الأيونات داخل المسام الدقيقة للخرسانة، وتوفر ظروفًا ملائمة لتكوين مركبات تمديدية كالإترنجيت والجبس، مما يؤدي إلى تشققات سطحية وداخلية وتقليل متانة الخرسانة. كما وجدت أبحاث حديثة أن شدة التدهور تتأثر بعوامل متداخلة تشمل تركيز الكبريتات، مدة وعدد دورات التجفيف والترطيب، نوع الأسمنت المستخدم، ومدى احتواء الخلطة الخرسانية على مواد بوزولانية. وأثبتت الدراسات أن استخدام خبث الأفران العالية والرماد المتطاير يساهم في تحسين مقاومة الخرسانة للكبريتات عن طريق تقليل النفاذية وتحسين بنية العجينة الأسمنتية. بناءً على هذه الخلفية، تبرز الحاجة إلى مراجعة منهجية لأثر دورات الجفاف والرطوبة على الخرسانة في وجود كبريتات الصوديوم، مع التركيز على فهم الآليات المتسببة في التدهور وتحديد المعايير التصميمية والتقنية المناسبة للحد من هذا التأثير. من جهة أخرى، يمكن أن يساهم الاستبدال الجزئي للأسمنت البورتلاندي بالرماد المتطاير في تقليل تأثير تآكل الكبريتات بشكل فعال. رغم ذلك، لا يعني بالضرورة أن زيادة كمية الرماد المتطاير تؤدي دائمًا إلى تحسين أكبر في مقاومة الخرسانة لهجوم الكبريتات، بل الأهم هو استخدام الكمية المناسبة التي يمكن أن تحسن البنية الداخلية للخرسانة وتقلل من تأثير الكبريتات. كما أن خفض نسبة ماء الخلط في الخلطة الأسمنتية يمكن أن يساهم بشكل كبير في تعزيز مقاومة الخرسانة لهجوم كبريتات الصوديوم خلال دورات الجفاف والترطيب.

أخيرًا، تمديد دورات التجفيف والترطيب لفترات طويلة لا يؤدي بالضرورة إلى زيادة التدهور بشكل ملحوظ بعد نقطة معينة. بناءً على ذلك، يوصى بضبط مدة الدورة بين 7 و 14 يومًا عند اختبار مقاومة الخرسانة لهجوم كبريتات الصوديوم في ظروف الجفاف الطبيعية، حيث توفر هذه الفترات توازنًا مناسبًا بين محاكاة البيئة الحقيقية وتقييم أداء الخرسانة.

4- المراجع

- [1]. Liao, K.X.; Zhang, Y.P.; Zhang, W.P.; Wang, Y.; Zhang, R.L. (Modeling constitutive relationship of sulfate-attacked concrete). Constr. Build. Mater. 260. (2020).
- [2]. He, R.; Zheng, S.N.; Vincent, J.L.; Wang, Z.D.; Fang, J.H.; Shao, Y. (Damage mechanism and interfacial transition zone characteristics of concrete under sulfate erosion and Dry-Wet cycles). Constr. Build. Mater. 255. (2020).
- [3]. Alyami, M.H.; Alrashidi, R.S.; Mosavi, H.; Almarshoud, M.A.; Riding, K.A. (Potential accelerated test methods for physical sulfate attack on concrete). Constr. Build. Mater. (2019), 229.
- [4]. Rajamma, R.; Ball, R.J.; Tarelho, L.A.C.; Allen, G.C.; Labrincha, J.A.; Ferreira, V.M. (Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials). J. Hazard. Mater., 172, 1049–1060. (2009)
- [5]. M.T. Bassuoni et al. (Response of concrete to accelerated physical salt attack exposure) Cem. Concr. Res. (2016)
- [6]. Cheng, S.K.; Shui, Z.H.; Gao, X.; Yu, R.; Sun, T.; Guo, C.; Huang, Y. (Degradation mechanisms of Portland cement mortar under seawater attack and drying-wetting cycles). Constr. Build. Mater. (2020)
- [7]. Fang Liu, Zhanping You, Rui Xiong, Xu Yang, (Effects of Sodium Sulfate Attack on Concrete Incorporated with Drying-Wetting Cycles), (2021)
- [8]. Chen, Y.; Liu, P.; Zhang, R.L.; Hu, Y.; Yu, Z.W. (Chemical kinetic analysis of the activation energy of diffusion coefficient of sulfate ion in concrete). Chem. Phys. Lett 753, (2020),.
- [9]. Guan Y., Sun W., and Miao C., (One service-life prediction model for the concrete based on the reliability and damage theories I: narration and establishment of the model), Journal of the Chinese Ceramic Society 29, no. 6, 509–513. (2001)
- [10]. Cheng, Y.Z.; Dong, Y.; Diao, J.K.; Zhang, G.Y.; Chen, C.; Wu, D.X. MSWI (Bottom Ash Application to Resist Sulfate Attack on Concrete). Appl. Sci. 9, 5091 (2019).
- [11]. Nehdi, M.L.; Suleiman, A.R.; Soliman, A.M. (Investigation of concrete exposed to dual sulfate attack). Cem. Concr. Res 64, 42–53. (2014).

- [12]. Cheng, S.K.; Shui, Z.H.; Gao, X.; Lu, J.X.; Sun, T.; Yu, R. (Degradation progress of Portland cement mortar under the coupled effects of multiple corrosive ions and drying-wetting cycles). *Cem. Concr. Compos*, 111.(2020).
- [13]. Neville, A. (The confused world of sulfate attack on concrete). *Cem. Concr. Res.* 34, 1275–1296. (2004)
- [14]. Chen, H.C.; Huang, H.L.; Qian, C.X. (Study on the deterioration process of cement-based materials under sulfate attack and drying–wetting cycles). *Struct. Concr.* 19, 1225–1234.(2018).
- [15]. Wang, K.; Guo, J.J.; Wu, H.; Yang, L.(Influence of dry-wet ratio on properties and microstructure of concrete under sulfate attack). *Constr. Build. Mater*,263. (2020).
- [16]. Ma, H.Y.; Gong, W.; Yu, H.F.; Sun, W. (Durability of concrete subjected to dry-wet cycles in various types of salt lake brines). *Constr. Build. Mater* 193, 286–294, (2018).
- [17]. Sahmaran, M.; Erdem, T.K.; Yaman, I.O. (Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to wetting-drying and heating-cooling environments). *Constr. Build. Mater.*, 21, 1771–1778. (2006)
- [18]. Guo, J.J.; Yang, M.; Chen, H.L.; Han, J.H. (Experimental study on fracture properties of modified concrete attacked by sulfate corrosion under dry-wet circulation). *J. Hydraul. Eng. ASCE*, 49, 419–427. (2018)
- [19]. Ganjian, E.; Pouya, H.S. (The effect of Persian Gulf tidal zone exposure on durability of mixes containing silica fume and blast furnace slag). *Constr. Build. Mater.*, 23, 644–652. (2008)
- [20]. Yang, K.H.; Lim, H.S.; Kwon, S.J.(Effective Bio-Slime Coating Technique for Concrete Surfaces under Sulfate Attack). *Materials* , 13, 1512. (2020)
- [21]. Liu, F.; You, Z.P.; Diab, A.; Liu, Z.Z.; Zhang, C.; Guo, S.C.(External sulfate attack on concrete under combined effects of flexural fatigue loading and drying-wetting cycles). *Constr. Build. Mater.* 249. (2020).
- [22]. Pang, C.M.; Xu, J.; Wang, J.; Wang, L.; Qin, H.G.; Sun, W. (Investigation of the Process and Regime of Drying and Wetting of Concrete). *Build. Mater.* 16, 315–320,(2013).
- [23]. Sutrisno, W.; Suprobo, P.; Wahyuni, E.; Iranata, D. (Experimental Test of Chloride Penetration in Reinforced Concrete Subjected to Wetting and Drying Cycle). *Appl. Mech. Mater*, 851, 846–851.(2016)
- [24]. Sobhan, K.; Gonzalez, L.; Reddy, D.V. (Durability of a pavement foundation made from recycled aggregate concrete subjected to cyclic wet dry exposure and fatigue loading). *Mater. Struct.*, 49, 2271–2284. (2016)
- [25]. Liu, R.D.; Zhang, J.W.; Liu, S.W.; Li, K.; Zhang, C.Y. (Effect of sulfate dry-wet circulation environment on concrete performance). *Concrete*, 4, 16. (2018)
- [26]. Liu, Q.D.; Liu, R.G.; Jiang, H.; Teng, B.; Lu, C.H. (Artificial climate simulation acceleration test design of concrete structure in wet-dry cycling zone). *Concrete*, 11, 55–57. (2018)
- [27]. Liu, J.Y.; Huang, Z.Y.; Zhu, J.H.; Liu, W.; Zhang, W.(Effect of Fly Ash as Cement Replacement on Chloride Diffusion, Chloride Binding Capacity, and Micro-Properties of Concrete in a Water Soaking Environment). *Appl. Sci.*, 10, 6271, (2020)
- [28]. GB/T 50082-2019. Standard for Test Method of Long-Term Performance and Durability of Ordinary Concrete; Chinese Standard Institution Press: Beijing, China, (2019).
- [29]. ASTM C1012. Standard Test Method for Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, (2010).
- [30]. Scherer, G.W. (Stress from crystallization of salt). *Cem. Concr. Res.*, 34, 1613–1624. (2004)
- [31]. Guo, J.J.; Wang, K.; Guo, T.; Yang, Z.Y.; Zhang, P. (Effect of Dry-Wet Ratio on Properties of Concrete under Sulfate Attack. *Materials*), 12, 2755. (2019)
- [32]. Zhang, H.; She, W. (A Modulus Variation Model of Concrete under External Sulfate Attack: New Perspective from Statistical Evolution of Microcracks). *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* , 33, 1465–1471. (2018)

- [33]. Golewski, G.L. (Estimation of the optimum content of fly ash in concrete composite based on the analysis of fracture toughness tests using various measuring systems). *Constr. Build. Mater.*, 213, 142–155.(2019)
- [34]. Jin-Jun Guo ,Peng-Qiang Liu, Cun-Liang Wu,Kun Wang, (Effect of Dry–Wet Cycle Periods on Properties of Concrete under Sulfate Attack),(2021).
- [35]. S. Zhutovsky .(Accelerated testing of cementitious materials for resistance to physical sulfate attack) *Constr. Build. Mater.*(2017)
- [36]. G. Massaad .(Advanced testing and performance specifications for the cementitious materials under external sulfate attacks)*Constr. Build. Mater.*(2016)
- [37]. R.J. Flatt (Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated) *J. Cryst. Growth*(2002)
- [38]. B.Y. Lee .(Effect of pore structure on salt crystallization damage of cement-based materials): Consideration of w/b and nanoparticle use *Cem. Concr. Res.*(2017)
- [39]. T. Stryzewska .(The effects of salt crystallization in ceramic bricks in terms of line deformations *Procedia Eng.*.(2017)
- [40]. Z. Liu .Does (concrete suffer sulfate salt weathering) *Constr. Build. Mater.*(2014)
- [41]. Z. Liu .The role of Ca(OH)_2 in sulfate salt weathering of ordinary concrete *Constr. Build. Mater.*(2016)
- [42]. Z. Lafhaj .Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content *Cem. Concr. Res.*(2006)
- [43]. M.T. Bassuoni .(Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading) *Cem. Concr. Res.*(2009)
- [44]. L. Jossierand .(Bleeding of concrete as an ageing consolidation process) *Cem. Concr. Res.*(2006)
- [45]. İ.B. Topçu .(Influence of concrete properties on bleeding and evaporation) *Cem. Concr. Res.*(2004)
- [46]. ACI Committee 201, Guide to durable concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills.
- [47]. R.J. Flatt .(A commented translation of the paper by C.W. Correns and W. Steinborn on crystallization pressure *Environ). Geol.*(2006)
- [48]. T.P. Dolen .(Effects of Concrete Deterioration on Safety of Dams), Department of the Interior Bureau of Reclamation(2003)
- [49]. Ragoug, R.; Metalssi, O.O.; Barberon, F.; Torrenti, J.M.; Roussel, N.; Divet, L.; de Lacaillerie, J.B.D. (Durability of cement pastes exposed to external sulfate attack and leaching: Physical and chemical aspects). *Cem. Concr. Res.*, 116, 134–145, (2019).
- [50]. Suleiman, A.R.; Soliman, A.M.; Nehdi, M.L. (Effect of surface treatment on durability of concrete exposed to physical sulfate attack). *Constr. Build. Mater.*, 73, 674–681. (2014)
- [51]. A Hu,H Xu,J Ye,M Yan,L Zhang,B Zhang,C li,(mplug-docowl 1.5;unified structure learning for ocr-free document understanding),2024.
- [52]. S Yan,Z Yang,H Li,C Song,L Guan,H Kang,G Hua,(implicit autoencoder for point-cloud self-supervised representation learning),2023.
- [53]. Jin jun Guo,peng,cun,wang,(Effect of dry-wet cycle Periods on properties of concret under sulfat attack),2021.
- [54]. Santhanam,(proposed mechanism of sodium sulphate attack),2002