المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

دراسة العوامل المساهمة في تآكل الهياكل الخرسانية: الرطوبة، العوامل الجوية، والزمن

Corrosion Factors Contributing to the Corrosion of Concrete Structures: Moisture, Weathering, and Time

المهندس/ أنور عبدالله جديع الغانم

عضو هيئة تدريب في الهيئة العامة للتعليم التطبيقي والتدريب ـمعهد التدريب الانشائي

الملخص

تآكل الهياكل الخرسانية من أخطر الظواهر في قطاع التشييد. تهدف هذه الدراسة إلى التعرف على آلية تآكل الهياكل الخرسانية والعوامل المؤثرة عليه بالتركيز على الرطوبة والعوامل الجوية والزمن. اعتمدت الدراسة المنهج الوصفي القائم على مراجعة الأدبيات السابقة. أظهرت نتائج الدراسة أن العمليات الكهروكيميائية تولد أيونات ضارة تهاجم حديد التسليح وتؤدي إلى تآكله. كما أظهرت النتائج أن نواتج عملية التآكل تزيد من الضغط على الخرسانة وتتسبب في تشققها وتدورها المبكر. من جهة أخرى، تساهم الرطوبة ودرجات الحرارة العالية في تعزيز التآكل لان هذه الظروف تولد الأيونات الضارة بحديد التسليح. توصي الدراسة بإجراء دراسات مخبرية على عينات من الخرسانة المسلحة في ظروف بيئة مختلفة

الكلمات المفتاحية: التدهور المبكر. تآكل الهياكل الخرسانية، حديد التسليح، الرطوبة، العوامل الجوية، الزمن.

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

Abstract

Concrete structure corrosion is a major construction risk. This study aims to identify the mechanism of corrosion of concrete structures and the factors affecting it, focusing on humidity, weather factors, and time. The study adopted the descriptive approach based on a review of previous literature. The results of the study showed that electrochemical processes generate harmful ions that attack the reinforcing steel and lead to its corrosion. The results also showed that the products of the corrosion process increase the pressure on the concrete and cause it to crack and rotate prematurely. On the other hand, humidity and high temperatures contribute to enhancing corrosion because these conditions generate ions harmful to the reinforcing steel. The study recommends conducting laboratory studies on reinforced concrete samples under different environmental conditions.

Keywords: Early deterioration. Corrosion of concrete structures, Reinforcing steel, Moisture, Weather factors, Time.

المقدمة

تشكل مادة الخرسانة واحدة من أهم المواد المستخدمة في قطاع المباني والانشاءات وذلك نتيجة توافرها على نطاق واسع محلياً وانخفاض سعرها. في المقابل تواجه الهياكل الخرسانية العديد من المشكلات فيما يتعلق بكفاءتها وقدرتها على تحمل الاجهادات المصممة من أجلها خلال عمرها الافتراضي، والتدهور المبكر للخرسانة واحد من أهم هذه المشكلات (السوداني وآخرون، ٢٠٠٤).

يحدث هذا النوع من التدهور بشكل أساسي نتيجة تعرض حديد الخرسانة للتآكل، ويرتبط هذا التآكل بهجوم بعض الأيونات الضارة على غطاء الخرسانة فتتسبب في تدميره وتآكل سطح الفولاذ كما تحفز بعض المواد كالأكسجين والماء من التفاعلات المكونة لهذه الأيونات وبالتالي حدوث التآكل (Nieves-Mendoza, et al., 2012). كما تتعرض الخرسانة في بعض البيئات لظروف صعبة تتسب بحدوث تشققات في الخرسانة مما يعزز من فرص دخول بعض المواد لحديد التسليح المغمور فيها وعليه تسريع تآكله (هلال، ٢٠١٢).

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

تشير الدراسات إلى العديد من العوامل المؤثرة على تآكل الهياكل الخرسانية كجودتها وحالة التسليح ومساميتها وظروف البيئة المحيطة فيها، حيث أن تواجد هذه الهياكل في بيئات معينة يعزز من تآكلها وبشكل خاص البيئات ذات الرطوبة ودرجات الحرارة العالية والتي تحتوي على الأملاح والكبريتات وغيرها من المواد الكيميائية الضارة بالخرسانة.

ونظراً لأهمية هذه الظاهرة وتأثيرها على جوانب متعددة اقتصادية وبيئية في قطاع التشييد والبناء فإن من المهم تحديد العوامل المؤثرة فيها، وعليه تبحث الدراسة في تأثير كل من الرطوبة والعوامل الجوية والوقت على تآكل الهياكل الخرسانية.

المشكلة

يعد تآكل الهياكل الخرسانية واحدة من أهم المشاكل التي تواجه قطاع الانشاءات، حيث تتسبب بالعديد من الأضرار سواء على مستوى الاقتصاد أو البيئة، تشير الدراسات أن تآكل الهياكل الخرسانية يتسبب بخسائر اقتصادية كبيرة ، حيث تتطلب عمليات صيانة وتدخلات اصلاحية مكلفة. على الجانب البيئي، فإن تدهور الهياكل الخرسانية وتآكلها يؤدي إلى زيادة معدل مخلفات البناء وتلوث الهواء (Kumar et al., 2024) وهذا ما أكدته دراسة (Medeiros-Junior et al., 2014) والتي أشارت أن تآكل حديد التسليح يقلل من العمر الافتراضي للخرسانة خاصة على المدى الطويل الأمر الذي يتسبب بأضرار اجتماعية، وبيئية واقتصادية.

الأسئلة

تسعى الدراسة إلى الاجابة عن الأسئلة الآتي:

- كيف يحدث تآكل الهياكل الخرسانية؟
- ما العوامل المؤثرة على تآكل الهياكل الخرسانية؟

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

- كيف تساهم كل من الرطوبة والعوامل الجوية والوقت على تآكل الهياكل الخرسانية؟

الأهداف

تهدف الدراسة إلى تحقيق الأهداف الآتية:

- التعرف على آلية حدوث تآكل الهياكل الخرسانية.
- التعرف على العوامل المؤثرة على تآكل الهياكل الخرسانية.
- التعرف على مساهمة كل من الرطوبة والعوامل الجوية والوقت في تآكل الهياكل الخرسانية.

الأهمية

تكمن أهمية الدراسة في مناقشة تآكل الهياكل الخرسانية واحدة من أهم القضايا المؤثرة على المباني الخرسانية والتي تسبب في تدهورها مبكراً، وبالتالي لا بد من التعرف على العوامل المساهمة في هذه الظاهرة للحد منها قدر المستطاع.

المنهجية

اعتمدت الدراسة المنهج الوصفي وذلك من خلال مراجعة الأدبيات ذات الصلة، مع التركيز على ما يجب عن أسئلة الدراسة ويحقق أهدافها.

الدراسات السابقة

هدفت دراسة (Nieves-Mendoza, et al., 2012) بعنوان" التحليل الإحصائي للعوامل المؤثرة على التآكل في الهياكل الخرسانية"، إلى التعرف على العوامل المؤثرة على تآكل الهياكل الخرسانية. اعتمدت الدراسة على القياسات الكهروكيميائية وبعض النماذج والمعادلات الرياضية الاحصائية. أشارت نتائج الدراسة أن تأثير أيونات الكلوريد على معدل التآكل لم يكن ذا دلالة إحصائية، فيما كان

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

تأثير أيونات الكبريتات دال إحصائياً. فيما بينت الدراسة عدم وجود تأثير لحالة قضيب الحديد (محمي أو غير محمي) تأثير كبير على معدل التآكل. فيما أثر تباين عملية تصنيع الحزم (beam fabrication process) بشكل كبير على معدل التآكل.

أما دراسة (يعقوب، كباش، و صالح، ٢٠١١) بعنوان " تقييم مقاومة التآكل للحديد المستخدم في تقوية الخرسانة الكونكريتية في أوساط مائية مختلفة" فهدفت إلى تحديد مقاومة الحديد المستخدم في الخرسانة للتآكل في أوساط مائية مختلفة وتشمل ماء المطر، ماء البحر وماء الاسالة. اعتمدت الدراسة المنهج التجريبي، حيث تم تصنيع ثلاثة عينات لحديد الخرسانة بمواصفات (ASTM) ، بعدها تم اجراء اختبار التآكل تبعاً لطريقة الوزن المفقود. أشارت نتائج الدراسة أن جميع الأوساط أدت إلى تآكل المعدن بنسب متقاربة، فيما كان معدل التآكل في ماء البحر هو الأعلى، الأمر الذي يؤكد أن عملية تفاعل الحديد مع الاكسجين المذاب في الأوساط المائية يؤدي إلى تآكل الحديد وتكوين الصدأ.

فيما جاءت دراسة (هلال، ٢٠١٢) بعنوان " تأثير أملاح الكلوريدات على المنشآت الخرسانية المسلحة" ، بهدف التعرف على أبعاد مشكلة تآكل الخرسانة وأسبابها وآليات السيطرة عليها. حيث أشارت الدراسة أن تآكل الخرسانة واحدة من أكثر المشاكل التي تواجه المنشآت الخرسانية في العراق، خاصة في ظل زيادة نسبة أملاح الكلوريد في التربة والمياه الجوفية، فضلاً عن ارتفاع درجات الحرارة في الصيف ما يعزز من حدوث الكثير من التشققات، وبالتالي تسهيل دخول الأيونات والمواد الضارة المتواجدة في التربة بما يؤدي إلى تمزق الطبقة الواقية المحيطة بحديد التسليح وتسريع تآكله. كما يتسبب تعرض الخرسانة لأملاح الكلوريدات إلى نقصان الكثافة بنسبة (١,٥%) وانخفاض مقاومة الانثناء بنسبة (١٣٨%) خلال ٢٨ يوم.

أما دراسة (Ismail & Egba, 2017) بعنوان " تأثيرات المناخ والتآكل على سلوك الخرسانة " فهدفت إلى التحقق في تأثير التآكل على الخرسانة تبعاً للعوامل المناخية وذلك من خلال حساب قوة

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

الالتصاق. اعتمدت الدراسة المنهج التجريبي، حيث تم تحضير عينات الخرسانة من خليط خرساني ملوث بما يقارب ٣,٥ كغم^{٣} من كلوريد الصوديوم لتسريع التآكل. تم معالجة العينات بمحلول كلوريد الصوديوم بنسبة ٣,٥% من الماء وذلك لمدة (٢٨) يوم. وتم اجراء الاختبارات على فترات زمنية ولمدة عام لقياس تأثير الظروف على التآكل وقوة التصاق الخرسانة. أشارت نتائج الدراسة أن نسبة الترابط للخرسانة انخفضت بعد عام واحد من تعريض العينات للمناخ الطبيعي غير المحمي بنسبة (٣٨%) وأما تعرضها للمناخ الطبيعي المحمي أدى إلى تآكلها بنسبة (٢٨%) فيما تسببت بيئة المختبر المحيطة بنسبة تآكل (٨%). وتشير النتائج إلى أن المناخ يؤثر على التآكل، مما يقلل من الترابط المتشابك بين قضيب التسليح والخرسانة المجاورة وقوة الالتصاق بينها.

كما هدفت دراسة (أبو صبيع، ٢٠١٨) بعنوان " دراسة تآكل الخرسانة وفولاذ التسليح الناتج من أملاح الكبريتات والكلوريدات وأثره علي مقاومة ضغط الخرسانة في منطقة صبراته: شمال غرب ليبيا"، إلى تأثير الأملاح والغازات والرطوبة والأوساط المخبرية الأخرى في منطقة صبراتة على الخرسانة. تم اجراء دراسة مخبرية، حيث تم تحضير مجموعة من عينات الخرسانة من الاسمنت البورتلاندي العادي والاسمنت المقاوم للكبيرتات واختبارها خلال عدة أزمنة؛ ٢٨ يوم، ٦٠ يوم، ٩٠ يوم، ١٨٠يوم، و٣٦٥ يوم مع توفير ظروف مخبرية مشابهة لظروف المنطقة. أشارت نتائج الدراسة أن الرطوبة ودرجات الحرارة المرتفعة والغازات الناتجة عن المناطق الصناعية تعزز من فقدان الخرسانة للرطوبة، كما تزيد من إماهة الاسمنت، الأمر الذي يؤدي إلى تناقص جودة الخرسانة الطرية والمتصلبة وزيادة نسب تآكلها.

كما جاءت دراسة (Bouteillera, et al., 2012) بعنوان " تأثير الرطوبة ودرجة الحرارة على تآكل مؤشرات الخرسانة المسلحة" بهدف فحص ر تأثير درجة الحرارة والرطوبة على الخصائص الكهروكيميائية للخرسانة ؛ الجهد، ومقاومة الاستقطاب الخطي ومعدل التآكل. تم اجراء التجربة على

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

عينات من الخرسانة المسلحة. أشارت نتائج الدراسة أن درجة الحرارة والرطوبة تؤثر بصورة مباشرة على كل من الجهد ومقاومة الاستقطاب الخطي ومعدل التآكل للخرسانة.

فيما هدفت دراسة (Zucca, et al., 2024) بعنوان " تأثير تغير المناخ على تآكل الجسور الخرسانية المسلحة وأدائها الزلزالي " إلى التعرف على أثر تغير المناخ على تآكل الخرسانة و الأداء الزلزالي للمنشآت. تم العمل على تقييم العديد من السيناريوهات للتغيرات المتوقعة على تركيز ثاني اكسيد الكربون ودرجات الحرارة والرطوبة النسبية. أشارت نتائج الدراسة أن تغير المناخ يؤدي إلى تغير كبير في تركيز درجات الحرارة والرطوبة وتركيز ثاني أكسيد الكربون، وهذه العوامل ينتج عنها تأثيرات سلبية على الهياكل الخرسانية، حيث يؤثر على معدل تدهور الموارد وبالتالي تآكلها، وهذا التدهور يضعف من أداء الخرسانة في مقاومة الزلازل.

فيما هدفت دراسة (Chauhan & Sharma, 2020) يعنوان " تحديد العوامل المؤثرة على معدل التآكل في الخرسانة المسلحة في ظل مناخ طبيعي محاكي " إلى فحص تأثير بعض العوامل على معدل التآكل في الخرسانة المسلحة. من خلال عمليات التجريب المخبري، بينت الدراسة أن نسبة الماء إلى الاسمنت هو العامل الأكثر تأثيراً على تشقق وتآكل سطح الخرسانة، كما يؤثر وقت البلل على معدل التآكل، فكلما زاد وقت البلل واد معدل التآكل. كما وجد أن تركيز الكلوريد الخارجي وقطر قضيب التسليح لها تأثير بسيط على التأكل. فيما لا يؤثر معدل تآكل كثيراً بقيم غطاء الخرسانة. فضلاً عن ذلك، فإن الرطوبة النسبية العالية في تؤدي إلى معدلات تآكل أكبر.

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

الإطار النظري

– مفهوم الخرسانة

تعرف الخرسانة على أنها مادة انشائية مكونة بشكل أساسي من الاسمنت، تستخدم على نطاق واسع في قطاع المباني والانشاءات، وذلك بسبب سماتها الميكانيكية وقدرتها على مقاومة الانضغاط (الزروق و محمد، ٢٠٢٢)، كما أنها مادة متوافرة بكثرة وذات تكلفة متناسبة ومعقولة ساهمت في زيادة حركة الاعمار القائم على هذه المادة (الزحيلي و مقبل، ٢٠١٤).

تتكون الخرسانة بصرة أساسية من مادة اسمنتية يتم مزجها بالماء، لتتحول بعد مدة زمنية إلى مادة صلة قادرة على تحمل اجهادات الضغط، أما إجهادات الشد فلا يمكن تحملها إلا من خلال إضافة حديد التسليح، فتصبح الخرسانة مسلحة (يعقوب، كباش، و صالح، ٢٠١١). وهي شكل أكثر تطوراً من الخرسانة العادية، تتضمن عدد من قضبان التسليح الفولاذية (حديد التسليح) أو شبكة منها، مما يحسن من خواصها ويجعلها أكثر تناسباً مع التطبيقات الهيكلية المختلفة (الزروق و محمد، ٢٠٢٢).

تتكون الخرسانة العادية من الاسمنت والماء ومادة كتلية كالرمل والحصى أو الحجر المكسر، وتتميز بقوتها في تحمل اجهادات الشد، إلا أنها ضعيفة نسبياً في تحمل الشد، الأمر الذي يعرضها لحدوث تشققات في هياكلها في تعرضها لقوى الشد. أما الخرسانة المسلحة فتتكون من مكونات الخرسانة العادية ذاتها، إلا أنها مدمجة مع شبكة تسليح فولاذي يعزز من قدرة الخرسانة على تحمل قوى الشد. وعليه فإن الاختلاف الرئيسي بين نوعي الخرسانة بكون الخرسانة العادية مصممة بغرض تحمل قوى الضغط، فيما تم تصميم الخرسانة المسلحة لتحمل قوى الضغط والشد(Lokhande et al., 2019) . وتبعاً لهذه الخصائص فإن الخرسانة المسلحة تستخدم بشكل أساسي في بناء الهياكل الانشائية كالجسور، والمباني، أما الخرسانة العادية، فتستخدم في عملية الرصف وصبات النظافة الموجودة في القواعد (Mitchell & Mitchell, 1906).

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

- **مكونات الخرسانة**

تتكون الخرسانة بعدة مكونات تضاف كل منها إلى خليط الخرسانة بنسبة محددة، وهذه النسبة تؤثر على جودة الخرسانة. تعتمد الخرسانة بشكل أساسي على مادة الاسمنت وهذه المادة عند خلطها بالماء تضيف للخرسانة خواصها الالتصاقية وتعزز على ربط الأجزاء ببعضها البعض، وهذه العملية تعرف بالإماهة (أبو صبيع، ٢٠١٨). ويتم تحديد مكونات الاسمنت البورتلاندي من خلال عملية تحليل الأكاسيد باستخدام عدة معادلات، وفي العادة يتكون الاسمنت البورتلاندي من سلكيات ثنائي الكالسيوم(C_2S)، سلكيات ثلاثي الكالسيوم(C_3S)، ألومنيات تلاثى الكالسيوم(C_3A)، وألومنيات حديد رباعي الكالسيوم (C_4AF) (البصيري، ٢٠١٦).

إلى جانب المادة الاسمنتية، يوجد الركام وهو مجموعة من الجسيمات ذات الأحجام المتباينة فيتدرج من حبيبات صغيرة وأخرى كبيرة وهذه الحبيبات عندما تختلط بالمادة الاسمنتية والماء فإنها تتماسك فيما بينها بمادة لاحمة تشكل عجينة الإسمنت (أبو صبيع، ٢٠١٨). ومن الجدير بالذكر أن الركام ينبغي أن لا يحتوي على مواد ضارة بنسبة أعلى من الحد المحدد ضمن المواصفات، وبشكل خاص الأملاح والكبريتات والكلوريدات وغيرها من المواد الكيميائية. ومن المهم أن تكون درجة المسامية للركام مناسبة، حيث أن المسامية والفراغات تساهم في تدهور الخرسانة، وذلك لأن وجود الفراغات داخل الحبيبيات يضعفها ويؤثر سلباً على قوتها، وفي الوقت ذات يزيد من قدرة الركام على امتصاص الماء وبالتالي مستوى النفاذية الكلية للخرسانة (البصيري، ٢٠١٦).

أما الماء الذي يستخدم في الخلطة الخرسانية فتكون بنسبة معينة ومدروسة وذو خصائص محددة فيجب أن لا يحتوي على مواد ضارة كالزيوت، والأحماض، والقلويات والأملاح (أبو صبيع، ٢٠١٨)، حيث أن هذه النسب تؤثر سلباً على خواص الخرسانة وحديد التسليح. ويعتبر خواص الماء الصالح للشرب

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

مناسبة لخلط الخرسانة، أما ماء البحر فهو غير مناسب للخلطات الخرسانية، وقد يستعمل في حالات ضرورية للخرسانات العادية غير المسلحة (البصيري، ٢٠١٦).

- **تآكل المنشآت الخرسانة**

يعرف تآكل المنشآت الخرسانية على أنه حدوث خلل في خواص المواد المكونة للخرسانة نتيجة مؤثرات داخلية وخارجية تتسبب بتلف أو ضرر أو تفاعلات تساهم في تآكل المادة أو تحللها ويظهر هذا التآكل على شكل شقوق أو تهالك للخرسانة وضعف قدرتها على تحمل الاجهادات المصممة من أجلها (الأغا، ٢٠٠٦).

تعد قضية التدهور المبكر للخرسانة (premature deterioration) وتآكلها من المواضيع التي تشغل بال الكثيرين في قطاع التشييد والبناء، فهي المادة الأكثر استخداماً فيه (السوداني وآخرون، ٢٠٠٤). يشكل تآكل فولاذ التسليح السبب الأساسي والأكثر شيوعاً للتدهور المبكر للهياكل الخرسانية وتآكلها وتقليل عمرها الافتراضي في كافة أنحاء العالم وخاصة تلك الموجودة في مناطق ساحلية بحرية أو مناطق أو تلك الموجودة في نطاق صناعي (Medeiros-Junior et al., 2014; Ismail & Egba, 2017)

عند حدوث عمليات الاماهة التي تربط جزيئات الخرسانة فإن الظروف القلوية تزيد وهذه الظروف تتسبب بتكوين طبقة رقيقة سلبية على سطح القضيب الحديدي (Passive Film) وهذه الطبقة تبقى تعمل بكفاءة ما دام الرقم الهيديوجيني لمحلول مسام الخرسانة مرتفعاً (السوداني وآخرون، ٢٠٠٤). وعليه فإن حدوث نقص في هذا الرقم(إلى ما يقل عن ١٠) يتسبب بتآكل الخرسانة سواء نتيجة عملية كربنة الغطاء الخرساني، أي تفاعل ثاني أكسيد الكربون مع هيدروكسيد الكالسيوم في الخرسانة وبالتالي تقليل درجة الحموضة ما يعرض الطبقة الواقية حول الفولاذ للخطر (Pushpakumara, 2024)، أو حدوث تناقص الحموضة نتيجة أو دخول الكلوريدات لمحلول المسام حيث تخترق أيونات

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

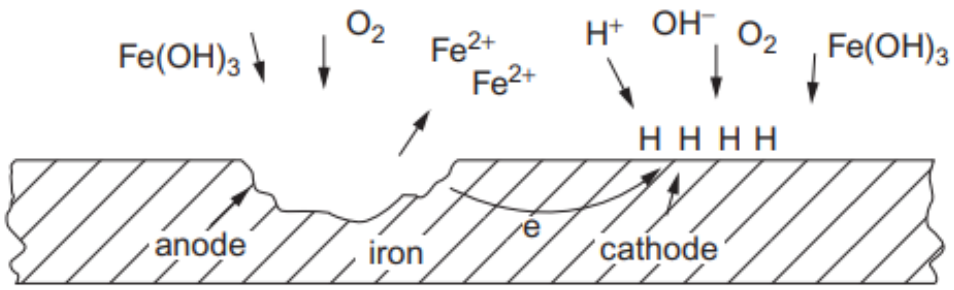
الكلوريد الخرسانة يؤدي إلى تكسير الفيلم السلبي على التسليح الفولاذي وبالتالي تآكل الخرسانة (Asmara, 2023)

وهذا ما تؤكده دراسة (Ismail & Egba, 2017) والتي أشارت إلى أن وجود كربونات الكالسيوم وأيون الكلوريد في الفيلم السلبي (Passive Film) حول حديد التسليح في الخرسانة هو السبب الرئيسي لتآكل الهياكل الخرسانية. كما أن نشاط المركبات التي تنتج عن تفاعل الأيونات وحديد التسليح يولد اجهاد شد ينتج عنه شقوق وتدهور كبير وتقشر للخرسانة. وعلى الرغم من كون الفليم السلبي على حديد التسليح يحمي الخرسانة من التآكل، إلا أن المناطق المعرضة لمناطق رطبة معرضة أكثر للتآكل خاصة في ظل وجود أكسيد الكربون وأيون الكلوريد(Egba et al., 2016) .

- **آلية تآكل المنشآت الخرسانية**

تشكل عملية تآكل حديد التسليح الموجود في الخرسانة عملية كهروكيميائية تشبه تماماً العمليات التي تحدث في البطارية الضوئية، وتتم باجتماع ثلاثة عوامل أساسية؛ أولاً: وجود خلل متحلل كهربائي يتسم بناقلية شاردية عالية وهو محلول المسام في الخرسانة. ثانياً: وجود الأكسجين في المنطقة المهبطية، وثالثاً: انحلال في المنطقة المصعدية وذلك من خلال إزالة السلبية الموجودة في السطح الفولاذي في الوسط القلوي. وباجتماع هذه العوامل يصبح سطح حديد التسليح بمثابة كالكترود مختلط مكون من مصاعد ومهابط متصلة ببعضها كهربائياً عن طريق الحديد ذاته (السوداني وآخرون، ٢٠٠٤؛ Sadeghi et al., 2019) ، والشكل (١) يوضح خلية تآكل في قضيب فولاذ تسليح مغموس في الخرسانة.

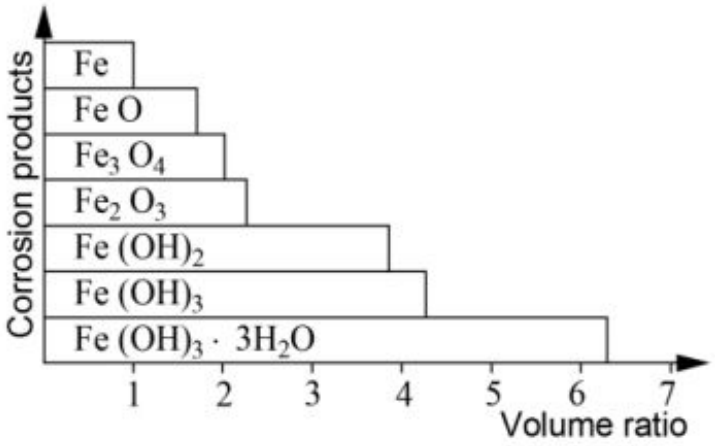
المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X



الشكل (١) : خلية تآكل في حديد التسليح المغموس في الخرسانة، المرجع: (Khoshnaw & Gubner, 2022)

تتسبب التفاعلات في المصاعد والمهابط بتفاعلات نصف الخلية فالتفاعل في المصاعد هو عملية أكسدة تؤدي إلى انحلال المعدل واضمحلاله، أما التفاعل المهبطي فيشأ من عملية اختزال، تؤدي إلى اختزال الأوكسجين لينتج شوارد الهيدروكسيل. وفيما يتعلق بحديد التسليح الموجود داخل الخرسانة، فإنه تحدث عنده العديد من التفاعلات المصعدية والمهبطية والتي تعتمد في حدوثها على عدة عوامل كالرقم الهيدروجيني ووجود شوارد سالبة وكمون كهروكيميائي مناسب. ومن الجدير بالذكر أن الماء والأكسجين عنصران ضروريات لحدوث هذه التفاعلات،فعندما تكون الخرسانة جافة فإن الأوكسجين ينتشر ويصل للحديد، أما عندما تصبح الخرسانة رطبة، فإن الماء يصل للحديد ويساهم في عملية التآكل، أما شوارد الكلوريد فتستطيع الاشتراك في تدمير الفيلم السلبي وبالتالي تعزيز عملية التآكل. وكنتاج لعملية التآكل تتولد في العادة نواتج ذات حجم أكبر من حجم الحديد مما يولد ضغوط كبيرة الحجم على الخرسانة التي ينغمس فيها هذا الحديد وبالتالي تشققها وتدهورها في وقت مبكر (السوداني وآخرون، ٢٠٠٤). والشكل (٢) يبين أوزان نواتج تآكل بالنسبة إلى حجم الحديد الأصلي.

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X



الشكل (٢): أوزان نواتج تآكل بالنسبة إلى حجم الحديد الأصلي، المرجع: (Knyziak et al., 2017)

- **تصنيف تآكل الخرسانة**

تحدث عملية تآكل الفولاذ بطرق متنوعة تبعاً لطبيعة المعدن والظروف البيئية السائدة وغيرها من العوامل، ويصنف التآكل تبعاً لمجموعة من العوامل. قيمكن أن تصنف تبعاً لطبيعة المادة المسببة للتآكل وتبعاً لذلك قد يكون التآكل رطباً أو جافاً، كما يمكن تصنيف التآكل تبعاً لآلية التآكل فقد يكون كهربائياً أو كيميائياً. كما تصنف تبهاً لمظهر المعدن المتآكل(Nayak & Dominic, 2021) وبالاعتماد على هذا المعيار يمكن تصنيف التآكل إلى خمس أنواع رئيسية نوضحها على النحو الآتي:

- **الذوبان الانتقائي (Selective dissolution):** تعرف على أنها الازالة المختارة لاحد المكونات النشطة في حديد التسليح كإزالة الزنك ما يؤدي إلى تغيرات في بنية المادة وخصائصها(Sadeghi et al., 2019). غالباً ما يحدث الذوبان الانتقائي بسبب الاختلافات في الجهد الكهروكيميائية بين المراحل في سبيكة الحديد ، مما يؤدي إلى التآكل التفضيلي لمرحلة على أخرى(Silva et al., 2021) . يمكن أن تساهم عوامل مثل الرقم الهيدروجيني

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

ودرجة الحرارة على وجود أيونات عدوانية تؤثر على معدل الذوبان الانتقائي (Mendibide & Dessolin, 2023).

- **التآكل النقطي (Pitting):** هو تآكل موضعي يحدث في منطقة معينة يتسبب بحفر صغيرة وعميقة على سطح قضبان التسليح المتضمنة في الخرسانة قد يؤدي في بعض الأحيان إلى حدوث ثقب، كحدوث ثقوب في الالمنيوم أو الفولاذ المقاوم للصدأ بوجود أيونات معينة ككليون (Clion) (Sadeghi et al., 2019). يبدأ التآكل النقطي عندما تخترق أيونات الكلوريد الخرسانة وتصل إلى سطح الفولاذ، متجاوزة عتبة بدء التآكل (Cardoso & Alexander, 2022). في حالات الفولاذ الكربوني، يمكن أن يتفاقم التآكل النقطي بسرعة ، بينما يُظهر الفولاذ المقاوم للصدأ مقاومة أكبر(Bezerra et al.,, 2024) .
- **موضعي (Localized):** يظهر هذا النوع من التآكل تآكل أعلى في مناطق محددة على سطح المعدن(Sadeghi et al., 2019) كما يعبر عن تآكل موضوعي في الخرسانة المسلحة، وبالتالي انخفاض في مساحة المقطع العرضي للصلب المقوى أو انخفاض في قوة الترابط (Val et al., 1998).
- **التآكل الموحد أو المنتظم (Uniform -or almost uniform):** في هذا النوع من التآكل، تتآكل كافة أجزاء المعدن بنفس النسبة كلأكسدة الأنودية والسلبية، و الذوبان النشط في الأحماض (Sadeghi et al., 2019). يؤدي التآكل المنتظم إلى تمدد الفولاذ، مما يمارس ضغطًا على الخرسانة المحيطة، مما يتسبب في تشقق وتقشر غطاء الخرسانة (Rodrigues et al., 2021).
- **التأثير المشترك للتآكل والعامل الميكانيكي (Conjoint action of corrosion and a mechanical factor):** هو نوع من أنواع التآكل يحدث بسبب تآكل موضوعي بسبب الوظيفية التعاونية لعامل التآكل والتآكل الميكانيكي(Sadeghi et al., 2019). يؤدي إلى

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

انخفاض قوة الالتصاق وانخفاض الخصائص الميكانيكية للتسليح الفولاذي وزيادة احتمالية بدء التآكل(Rodrigues et al., 2021) .

- **تقييم تآكل الخرسانة**

يتم الكشف عن التآكل في المنشآت الخرسانية من خلال مجموعة من الطرق الشائعة، وفي ما يلي نحدد الطرق التي يمكن استخدامها لتقييم التآكل:

- **قسائم التآكل (Corrosion Coupons):** تعد هذه الطريقة واحدة من أقدم طرق الكشف عن التآكل، تستخدم هذه القسائم للكشف عن حالات التآكل غير المعقدة، يتم تطبيق هذه الطريقة في المختبر تحت ظروف محددة(Tehada & Hernandez, 2013) .
- **المقاومة الكهربائية (Electrical Resistance):** تعتمد هذه الطريقة على تقييم التغيير في ثبات المكونات المعدنية للمقاومة الكهربائية المغمورة في وسط العائد بالنسبة لمكونات العائد المطوية في إطار المحبس(Brown, et al., 2014) . تشير الدراسات أن هذه الطريقة فعالة فيما يتعلق بتحديد المناطق المعرضة للمخاطر العالية، وبالتالي توفير معلومات كمية عن معدل التآكل في الهياكل الخرسانية المسلحة (Rodrigues et al., 2021) .
- **الاستقطاب الخطي (Linear Polarization Resistance)** : تُستخدم مقاومة الاستقطاب الخطي لتقييم التآكل في الهياكل الخرسانية المسلحة عن طريق قياس معدل تآكل الخلايا الدقيقة والخلايا الكبيرة باستخدام معادلة ستيرن-جيري المعدلة(Chen & Su, 2021) .
- **مجسات المقاومة الحثية (Inductive Resistance):** يتم استخدام هذه الطريقة لتقييم التآكل في الهياكل الخرسانية المسلحة عن طريق قياس مقاومة الاستقطاب، والتي توفر معلومات كمية عن معدل التآكل(Rodrigues et al., 2021).

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

- **المعاوقة الكهروكيميائية التحليل الطيفي(Electrochemical Impedance Spectroscopy):** تعتمد هذه الطريقة على تقييم مدى تآكل الهياكل الخرسانية المسلحة بشكل نوعي بناءً على الاختلافات في الطاقة الصوتية ومكونات التردد السائدة (Liu et al., 2020).
- **التعديل الترددي الكهروكيميائي (Electrochemical frequency modulation):** يتم حساب التآكل من خلال هذه الطريقة من خلال تحديد معدلات التآكل، وتحليل مقاومة الاستقطاب والتيار التآكلي، والتحقق من البيانات التجريبية من خلال عوامل السببية (Aperador et al., 2015).
- **التحليل التوافقي (Harmonic Analysis):** يتم إجراء التحليل التوافقي عن طريق إرسال جهد التيار المتردد بتردد وحيد وتسجيل كثافة التيار المتردد المقابلة، أي قياس التوافقيات الأعلى للرنين(Rivera & Castaño, 2012) .
- **مقياس المقاومة الصفرية (Zero Resistance Ammetery):** يفحص هذا المقياس التباين في التيار الجلفاني المستقطب مع الوقت، وإمكانية التآكل، ومقاومة الخرسانة، ودرجة الحرارة، مما يوفر رؤية حول مستوى التآكل في الهياكل الخرسانية المسلحة (Gulikers, 1997).

– **العوامل المؤثرة على تآكل الخرسانة**

تساهم العديد من العوامل في تآكل المنشآت الخرسانية، منها ما هو داخلي يستند إلى خصائص المكونات التي تم استعمالها في بناء هذه الهياكل، ومنا ما هو خارجي يعتمد على الظروف التي تحيط بالهياكل وفيما يلي نوضح أهم العوامل المؤثرة تآكل الهياكل الخرسانية:

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

- **جودة الخرسانة**

تتألف الخرسانة العادية من الاسمنت والماء وخليط من الركام الخشن والناعم. للحصول على خرسانة ذات جودة عالية، لا بد من مراعاة إضافة هذه المواد بالنسب والمواصفات المطلوبة، مع مراعاة اتباع طريقة خلط صحية واضافات تعزز من جودة الخرسانة وقدرتها على تحمل الاجهادات المطلوبة. في حال وجود خلل في جودة أي من المكونات، أو نسبتها وحتى الطريقة التي يتم من خلالها تصنيع الخرسانة، فإن ذلك سيتسبب بخرسانة رديئة تعزز من فرص تآكل حديد التسليح، بينما يمكن للخرسانة ذات الجودة العالية مقاومة التآكل والحد منه (Hussain et al., 1996).

- **سماكة غطاء التسليح الخرساني**

يساهم غطاء التسليح الخرساني في حماية الحديد من التعرض للظروف المحيطة من خلال توفير غطاء خرساني مناسب. في حال وجود هذا الغطاء بسماكة مناسبة فإنها توفر الحماية المطلوبة، بينما يعزز الغطاء الرقيق من فرص تآكل الخرسانة (Nayak & Dominic, 2021).

- **حالة التسليح**

في حال تلوث حديد التسليح بالأملاح فإن هذه الأملاح تؤدي إلى تعزيز فرص تآكل الخرسانة وذلك لأن هذه الأملاح تؤدي إلى تفتيت الفيلم السلبي، وتعزيز التآكل وخاصة الموضوعي، وبالتالي تدهور الهياكل الخرسانية وتشققها (Holly & Bilčík, 2018) .

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

- **المواد الكيميائية**

تتسبب المواد الكيميائية سواء تلك الموجودة في البيئة المحيطة أو الموجودة داخل الخرسانة في تعزيز فرص تآكل الخرسانة، حيث تتسبب الأملاح والكربونات والكلوريدات وتفاعلات الكبريتات مع ألومينات ثلاثي الكالسيوم الموجود داخل الاسمنت (Hussain et al., 1996).

- **مسامية الخرسانة**

تؤدي مسامية الخرسانة من نفاذيتها، ما يسمح باختراق المواد الكيمائية والأيونات العدائية للخرسانة مما يؤدي إلى الإضرار بها وبحديد التسليح الموجود داخلها. وتعتمد مسامية الخرسانة على عدة عوامل؛ حجم وتوزيع واستمرارية المسام الشعرية للخرسانة، نسبة الماء إلى حجم الاسمنت ونسبة رطوبة الخرسانة، درجة التماسك، وحجم الكتل ونوع الاسمنت (Nayak & Dominic, 2021).

- **الاجهاد الحراري العالي**

يمكن للخرسانة العادية أن تتحمل اجهاداً حرارياً يصل إلى ١٠٠٠ درجة مئوية، بعد هذا الحد تبدأ الخرسانة بالتدهور(Contento, et al., 2023) ، لهذا ينبغي للمنشآت الموجودة في بيئات حارة أو تلك المخصصة للأعمال الصناعية أو المرتبط بإنتاج الطاقة اتخاذ تدابير خاصة أو الاعتماد على مواصفات خرسانية معينة وإلا قد تتسبب الحرارة العالية بإنتاج شقوق تسرع من عملية التآكل المبكر للخرسانة (Nayak & Dominic, 2021).

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

- **حالة التجمد والذوبان**

في المناطق الباردة، تتجمد السؤال في مسام الخرسانة، وهذا الجليد يساهم في تمدد حجم الخرسانة مما يعزز من الضغط الداخلي للكتلة الخرسانية وبالتالي ظهور الشقوق ما يسرع من عملية تآكل حديد التسليح(Ebrahimi et al., 2018) .

- **تأثير الرطوبة على تآكل المنشآت الخرسانة**

تساهم الرطوبة في تدهور الهياكل الخرسانية، حيث تتسبب في تآكل حديد التسليح. يعزى هذا التأثير إلى مجموعة كبيرة من العوامل حيث تسهل الرطوبة من نقل العوامل المسببة للتآكل، حيث تسرع الرطوبة العالية انتقال أيونات الهيدروكسيل، مما يعزز التفاعلات الكهروكيميائية المؤدية للتآكل (Cheng & Maruyama, 2022). علاوة على ذلك، تؤثر الرطوبة على سرعة انتشار أيونات الكلوريد، وهي أيونات عدوانية تتسبب بتآكل الحديد (Zhang, et al., 2024). كما تؤدي الرطوبة رفع كميات الأكسجين في مسام الخرسانة، مما يقلل من خمول الفولاذ ويعزز نشاطه للتفاعل (Andrade, 2023).

وهذا ما أكدت عليه الكثير من الدراسات، فأشارت دراسة (Redondo, et al., 2021) أن الرطوبة العالية تتسبب بمعدلات متزايدة من التآكل وهي عامل مشترك في كثير من أنواع الضرر التي تتعرض له الهياكل الخرسانية. ولا ينتج ذلك عن تحفيز الرطوبة للأيونات الضارة فقط، بل أيضاً تساهم الرطوبة في تشقق الخرسانة وتقشرها(Alzeyadi & Yu, 2019) . كما لوحظ أن الهياكل الخرسانية الموجودة في أنظمة الصرف الصحي تتدهور بشكل مبكر نتيجة درجات الرطوبة العالية والتي تتسبب بنمو الميكروبات التي تزيد من فرص حصول التآكل(Jiang et al., 2014) .

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

- **تأثير العوامل الجوية على تآكل المنشآت الخرسانة**

تؤثر العوامل الجوية على الهياكل الخرسانية وتتسبب بعضها بتآكل حديد التسليح الموجود فيها وتدهورها بصورة مبكرة. إحدى الآليات التي تؤثر فيها العوامل الجوية هي الكربنة، حيث يخترق ثاني أوكسيد الكربون الموجود في الغلاف الجوي الخرسانة فيقلل من مستوى الرقم الهيدروجيني لمحلول المسام، وبانخفاض درجة الحموضة لهذا المحلول تزيد فرص الكربنة وبالتالي تآكل الخرسانة (Timcakova et al., 2015) وهذا ما أكدته دراسة كيم حيث أشار أن تفاعل ثاني أكسيد الكربون مع الماء الموجود في الخرسانة يقلل من قلويتها وبالتالي تآكل حديد التسليح(Kim et al., 2017)

علاوة على ذلك، تتسبب التغيرات في درجات الحرارة إلى حدوث تكرار في عملية تجمد وذوابان الموائع داخل الخرسانة وبالتالي تمددها وحدود تشققات فيها (Nasr et al., 2022) ويزداد هذا التأثير في البيئات الغنية بالكبريتات (Zhao et al., 2020).

- **تأثير الزمن على تآكل المنشآت الخرسانة**

تشير العديد من الدراسات أن تقدم عمر الخرسانة يؤدي إلى تفاقم تآكلها، حيث تنخفض قدرتها على تحمل الأحمال، وتظهر فيها التشققات مما يسرع تآكلها. في العادة يبدأ التآكل في حال تعرضت الخرسانة لأي من الظروف السابقة ، وفي حال كان غطاء الخرسانة سميكاً فإنه قد يستغرق بدء عملية التآكل سنوات عديدة، ألا أن وبمجرد البدء يحدث التآكل بصورة متسارعة (Idhamou et al., 2024).

كما تؤكد دراسة (Nieves-Mendoza, et al., 2012) أن الظروف الجوية والبيئية كالرطوبة النسبية ودرجات الحرارة وسرعة الرياح واتجاها والتقدم العمري (الشيخوخة) للخرسانة يساهم في تآكلها وتدهور كفاءتها.

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

- **طرق الحد من تآكل المنشآت الخرسانة**

يمكن الحد من تآكل الهياكل الخرسانية من خلال بعض الاجراءات، حيث يمكن العمل عل تحسين جودة الخرسانة من خلال بعض الإضافات؛ كالمواد الملدنة الفائقة، والمواد المقللة للانكماش، ومثبطات التآكل(Sadeghi et al., 2019). تساعد المواد الملدنة الفائقة (Superplasticizer) على تقليل الماء الموجود بالخرسانة حتى نسبة ٣٠% دون التأثير على قابلية التشغيل(Dinakar et al, 2007) . كما يمكن الحد من تآكل الخرسانة من خلال توفير غطاء خرساني ذو سماكة مناسبة، حيث يمنع هذا الغطاء في حال وجوده بسماكة جيدة تآكل حديد التسليح فعلى سبيل المثال يمكن لغطاء خرساني بسمك ٢٤ملم، أن يحتاج ١٠٠عام لبدء تآكل الحديد(Zongjin, 2011) . علاوة على ذلك، يساعد استخدام البوزولان وبعض الإضافات كبديل للإسمنت العادي على تحسين جودة الخرسانة(Broomfield, 2006) .

من جهة أخرى، يمكن استخدام ما يعرف بمثبطات التآكل وهما على نوعين أساسيين؛ النوع الأول هو مثبط الأنوديك؛ يعتمد هذا النوع على فيلم حفظ غير نشط على قضيب فولاذي في الخرسانة من أشهر هذه المثبطات وأكثرها استخداماً نترات الكالسيوم، وهذا النوع يعد مناسباً للخرسانة المتدفقة حيث لا يوجد أثر ضار على جودة الخرسانة في حال تصلبت. كما تستخدم نترات الصوديوم والبوتاسيوم للتثبيط الأنودي حيث تمتلك كفاءة عالية في منع التآكل، إلا انه لا يمكن استخدامها في المجاميع القلوية لان العنصران يتفاعلان مع المادة الاسمنتية ويؤديان إلى تدهور الخرسانة(Yu et al., 2015) . أما مثبط النوع الثاني فهو مثبط الكاثوديك وهذا النوع يتطلب طلاء سطح الخرسانة المتصلبة وتحريك قضبان الفولاذ عبر مساميتها، وبالتالي الحد من كمية الأكسجين التي تنتشر عبرها الخرسانة، وذلك لأن وجود الأكسجين على مستوى حديد التسليح هو السبب الرئيسي لظاهرة التآكل(Sadeghi et al., 2019).

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

الخاتمة

تناقش الدراسة تآكل الهياكل الخرسانية والعوامل المؤثرة عليها، مع تسليط الضوء على تأثير كل من الرطوبة والعوامل الجوية والوقت على هذا التآكل. تبين الدراسة مفهوم تآكل الخرسانة وآلية حدوثة، أنواع، طرق تقييمه، والعوامل المؤثرة عليه وكيفية الحد منه. تشير الدراسة أن الرطوبة ودرجات الحرارة العالية تعزز من التفاعلات الكهروكيميائية وانتاج الأيونات العدوانية الضارة بحديد التسليح وبالتالي تآكله. من جهة أخرى، ينتج التآكل مواد ثقيلة مما يزيد من الاجهاد الذي تتعرض له الخرسانة، وبالتالي تشققها وتدهورها، وهذه الشقوق تسمح لبعض المواد بالوصول لحديد التسليح وبالتالي تسريع تآكله.

المراجع

المراجع العربية

أبو صبيع، أبو القاسم يحيي أبو القاسم. (٢٠١٨). *دراسة تآكل الخرسانة وفولاذ التسليح الناتج من أملاح الكبريتات والكلوريدات وأثره علي مقاومة ضغط الخرسانة في منطقة صبراته: شمال غرب ليبيا*. السودان: جامعة أم درمان الاسلامية.

الأغا ، عودة محمد. (٢٠٠٦). التآكل في المنشآت وآثاره السلبية. *مجلة جامعة الأقصى*، ١٠ ، ١٢٢-١٤٤.

البصيري ، أبجاد محمد. (٢٠١٦). دور الإضافات الخاصة في تقوية الخرسانة المسلحة. *مجلة العلوم البيئية* ، ٣٢ ، ١٧٥-١٩٦.

الزحيلي، قاسم ، و مقبل، تماضر. (٢٠١٤). دراسة تجريبية على الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره. *مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية*، ٣٦ (٤)، ٢٥٣-٢٦٦.

الزروق ، عمر رمضان ، و محمد، هاجر فتحي. (٢٠٢٢). تدهور قوة الترابط بين الخرسانة و GFRP تحت تأثير المعالجة الحرارية. *المجلة الدولية للهندسة وتقنية المعلومات*، ١٠ (١)، ٩-١٥.

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

السوداني، عارف محمد ، الحسن، أحمد سليمان ، طالب، هاني ، و حامد ، حسام محي الدين. (٢٠٠٤). أثر العوامل الداخلية للخرسانة في تآكل فولاذ التسليح في المنشآت الخرسانية المسلحة. *مجلة باسل الأسد للعلوم الهندسية*، ٢٠ ، ١٤٣-١٧٥.

هلال، نهلة ناجي. (٢٠١٢). تأثير أملاح الكلوريدات على المنشآت الخرسانية المسلحة. *المؤتمر الهندسي الأول لكلية الهندسة* (الصفحات ٣١٧-٣٣٢). العراق: مجلة الأنبار للعلوم الهندسية.

يعقوب، ليث يوسف ، كباش ، زحل عبدالزهرة ، و صالح، موفق محمد. (٢٠١١). تقييم مقاومة التآكل للحديد المستخدم في تقوية الخرسانة الكونكريتية في أوساط مائية مختلفة. *مجلة الهندسة والتكنولوجيا*، ٢٩ (١٢)، ٤٩٧-٥٠٦.

المراجع الأجنبية

Alzeyadi, A., & Yu, T. (2019). Characterization of Moisture Content in a Concrete Panel Using Synthetic Aperture Radar Images. *Journal of Aerospace Engineering, 32*(1), 1-8.

Andrade, C. (2023). Role of Oxygen and Humidity in the Reinforcement Corrosion. *Proceedings of the 75th RILEM Annual Week 2021* (pp. 316-325). Merida, Mexico: RILEM Bookseries.

Aperador, W., Ruiz, E., & Bautista-Ruiz, J. (2015). Corrosion Study of a Carbon Steel Immersed in Concrete Alternative by Electrochemical Frequency Modulation. *International Journal of Chemical Sciences, 13* (3), 1137-1148.

Asmara, Y. P. (2023). Corrosion of Steel Reinforcement. In Y. P. Asmara, *Concrete Reinforcement Degradation and Rehabilitation: Damages, Corrosion and Prevention* (pp. 59-70). Singapore: Springer Nature .

Bezerra, W. V., Martínez, N., Coleman, S. L., Yanez, J. S., & Alexander, C. S. (2024). Corrosion Damage Evolution of Carbon and Stainless Steel Reinforced Concrete. *SSRN*.

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

Bouteillera, V., Cherriera, J.-F., L'Hostisb, V., Rebolledoc, N., Andradec, C., & Marie-Victoired, E. (2012). Influence of humidity and temperature on the corrosion of reinforced concrete prisms. *European Journal of Environmental and Civil Engineering, 3-4* , 471-480.

Broomfield, J. (2006). *Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair.* Florida, USA : CRC Press.

Brown, D. W., Connolly, R. J., Laskowski, B., Garvan, M., Li, H., Agarwala, V. S., & Vachtsevanos, G. (2014). A Novel Linear Polarization Resistance Corrosion Sensing Methodology for Aircraft Structure. *Proceedings of the Annual Conference of the PHM Society, 6* (1), 1-11.

Cardoso, M. d., & Alexander, C. L. (2022). The Feasibility of Using Bipolar Electrochemistry to Study Pitting and Crevice Corrosion of Stainless Steels in Cementitious Materials. *ECS Meeting Abstracts , MA2022-02* (11), 749-794.

Chauhan, A., & Sharma, U. K. (2020). Identifying factors influencing corrosion rate in reinforced concrete under simulated natural climate. *Current Science, 123*(11), 1327-1333.

Chen, L., & Su, R. K. (2021). Corrosion rate measurement by using polarization resistance method for microcell and macrocell corrosion: Theoretical analysis and experimental work with simulated concrete pore solution. *Construction and Building Materials, 267* , 1-15 .

Cheng, L., & Maruyama, I. (2022). Effect of relative humidity and temperature on steel corrosion rate in chloride contaminated mortar. *Cement Science and Concrete Technology, 75* (1), 225-232.

Contento, A., Aloisio, A., Xue, J., Quaranta, G., Briseghella, B., & Gardoni, P. (2023). Analysis of the Joint Effects of Thermal Stresses and Corrosion on Integral Abutment Bridges. *ce/papers - Proceedings in Civil Engineering, 6* (5), 1266-1269.

Dinakar, P., babu, k. g., & Santhanam, M. (2007). Corrosion behaviour of blended cements in low and medium strength concretes. *Cement and Concrete Composites, 29* (2), 136-145.

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

Ebrahimi, K., Daiezadeh, M. J., Zakertabrizi, M., Zahmatkesh, F., & Korayem, A. H. (2018). A review of the impact of micro- and nanoparticles on freeze-thaw durability of hardened concrete: Mechanism perspective. *Construction and Building Materials, 186* , 1105-1113.

Egba, E. I., Bakhary, N., & Ismail, M. (2016). Influence of Natural Climate Curing Treatment on Corrosion Activity of Reinforced Concrete. *Indian Journal of Science and Technology, 9* (46), 1-6.

Gulikers, J. (1997). Development of a galvanic monitoring probe to improve service life prediction of reinforced concrete structures with respect to reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials, 11* (3), 143-148.

Holly, I., & Bilčík, J. (2018). Effect of Chloride-Induced Steel Corrosion on Working Life of Concrete Structures. *Solid State Phenomena, 272*, 226-231.

Hussain, S. E., Al-Gahtani, A. S., & Uzzafar, R. (1996). Chloride threshold for corrosion of reinforcement in concrete. *ACI Materials Journal, 93*(6), 534-538.

Idhamou, L., Mansouri, M., & Lakhouili, A. (2024). Evaluation of corrosion initiation time for reinforced concrete rebars. *Materials Today, 3* , doi: 10.1016/j.matpr.2024.02.026.

Islam, M. S. (2019). Corrosion of steel in concrete due to chloride and sulphate attack. *Journal of Civil Engineering (IEB), 47* (1), 61-66.

Ismail, M., & Egba, E. I. (2017). Effects of climate and corrosion on concrete behaviour. *Proceedings of the 3rd International Conference on Construction and Building Engineering (ICONBUILD) 2017* (pp. 1-7). New York, USA : AIP Conference Proceedings.

Jiang, G., Keller, J., & Bond, P. L. (2014). Determining the long-term effects of H2S concentration, relative humidity and air temperature on concrete sewer corrosion. *Water Research, 65* (15), 157-169.

Khoshnaw, F., & Gubner, R. (2022). General Aspects of Corrosion, Corrosion Control, and Corrosion Prevention. In F. Khoshnaw, & R. Gubner, *Corrosion Atlas Case Studies* (pp. 25-41). Elsevier.

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

Kim, T. K., Choi, S.-S., & Kim, J.-H. J. (2017). Performance Based Evaluation of Carbonation Resistance of Concrete According to Various Curing Conditions from Climate Change Effect. *International Journal of Concrete Structures and Materials, 11*, 687-700.

Knyziak, P., Bieranowski, P., & Krentowski, J. R. (2017). Impact of corrosion processes in the basement level on the durability of the construction of large-panel buildings. *MATEC Web of Conferences, 117* , 1-6.

Kumar, R., Chaudhary, V. K., Pramanik, N., & Ghosh, S. (2024). Economic and Environmental Impact of Corrosion. *Advances in chemical and materials engineering book series* , 277- 296 .

Liu, P., Hu, Y., Geng, B., & Xu, D. (2020). Corrosion monitoring of the reinforced concrete by using the embedded annular piezoelectric transducer. *Journal of Materials Research and Technology, 9*(3), 3511-3519.

Lokhande, H., Yadav, J., & Singh, P. (2019). A detailed survey of loads in a reinforced concrete building. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education, 5*(2), 1895-1900.

Medeiros-Junior, R. A., Lima, M. G., & Medeiros, M. H. (2014). Service life of concrete structures considering the effects of temperature and relative humidity on chloride transport. *Environment, Development and Sustainability, 16*(6), 1-17.

Mendibide, C., & Dessolin, C. (2023). Selective Dissolution Forming on Duplex Stainless Steels During Sour Testing. Is it a Pass or a Fail? *Corrosion, 79* (2), 174-192.

Mitchell, C. F., & Mitchell, G. (1906). Reinforced Concrete or Ferro-Concrete. In S. J. Mitchell, *Building Construction and Drawing 1906* (pp. 502-515). London: Routledge.

Nasr, A., Honf, D., & Ivanov, O. L. (2022). Probabilistic analysis of climate change impact on chloride-induced deterioration of reinforced concrete considering Nordic climate. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 3* (8), 1-16.

Nayak, A. R., & Dominic, M. (2021). Corrosion of reinforced concrete: a review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 8*(6), 1691-1700.

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

Nieves-Mendoza, D., Gaona-Tiburcio, C., Hervert-Zamora, H. L., J, R. T., Castro-Borges, P., O, R. C., . . . Almeraya-Calderón, F. (2012). Statistical Analysis of Factors Influencing Corrosion in Concrete Structures. *International Journal of Electrochemical Science, 7*, 5495-5509.

Pushpakumara, B. H. (2024). *Corrosion in Concrete: Understanding the Corrosion of Reinforced and Pre-stressed Concrete Structures.* Hong Kong: BP International.

Redondo, G. P., Franco, G., Georgiou, A., Ioannou, I., Lubelli, B., Musso, S., . . . Vecchiattini, R. (2021). State of Conservation of Concrete Heritage Buildings: A European Screening. *Infrastructures, 6*(8), 1-15.

Rivera, A. L., & Castaño, V. M. (2012). Corrosion analysis by electrochemical noise: A teaching approach. *Journal of Materials Education, 34*(5), 151-159.

Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I., & Betelu, S. (2021). Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. *Construction and Building Materials, 269* , 1-36.

Sadeghi, K., Musa, M. K., & Nassrullah, H. M. (2019). Corrosion problems in RC structures: An overview of causes, mechanism, effects, controls and evaluation. *Academic Research International, 12* (2), 15-28 .

Silva, E. M., Fonseca, G. S., & Ferreira, E. A. (2021). Microstructural and selective dissolution analysis of 316L austenitic stainless steel. *Journal of Materials Research and Technology, 15* , 4317-4329.

Tehada, T., & Hernandez, A. (2013). *ELECTRICAL RESISTANCE PROBE CORROSION SENSORS FOR IN-SITU ASSESSMENT FOR WATERFRONT STRUCTURES.* Port Hueneme, USA : Naval Facilities Engineering and Expeditionary Warfare Center.

Timcakova, K., Štefková, D., & Chobola, Z. (2015). Determination of the Influence of Carbonation of Concrete and Corrosion of Steel on Reinforced Concrete Condition. *Advanced Materials Research, 1124* , 225-230.

Val, D. V., Stewart, M. G., & Melchers, R. E. (1998). Effect of reinforcement corrosion on reliability of highway bridges. *Engineering Structures, 20* (11), 1010-1019.

المجلة الإلكترونية الشاملة متعددة التخصصات
Electronic Interdisciplinary Miscellaneous Journal
العدد السابع والسبعون شهر (11) 2024
Issue 77, (10) 2024
ISSN: 2617-958X

Yu, Y., Sh, X., & Yang, P. (2015). Simulation on the steel galvanic corrosion and acoustic emission. *Sixth International Conference on Electronics and Information Engineering. 9794* , pp. 1-5 . Dalian, China: SPIE Conference Proceedings.

Zhang, G., Tian, Y., Liu, Y., Shao, Y., Chen, Z., Feng, H., . . . Zhang, Z. (2024). Dynamic Electrochemical Model of Steel Corrosion in Concrete Microenvironment under Multifield Action of Heat-Moisture-Chlorine. *Journal of Materials in Civil Engineering, 36* (1).

Zhao, G., Shi, M., Guo, M., & Fan, H. (2020). Degradation Mechanism of Concrete Subjected to External Sulfate Attack: Comparison of Different Curing Conditions. *Materials, 13* (14), 1-17 .

Zongjin, L. (2011). *Advanced concrete technology.* Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc.

Zucca, M., Landi, F., Puppio, M. L., Mistretta, F., Formichi, P., & Croce, P. (2024). Climate Change Impact on Corrosion of Reinforced Concrete Bridges and Their Seismic Performance. *Applied Sciences, 14* , 1-16.