Comprehensive Journal of Science
Volume (11), Issue (42), (Sapt, 2026)
ISSN: 3014-6266

مجلة العلوم الشاملة
المجلد (11) العدد 42 سبتمبر 2026
ردمد: 3014-6266

دراسة تآكل حديد التسليح في الخرسانة وطرق علاجها

عبدالمطلب محمد زائد المقروس
A.Magrous@.histr.edu.ly
مصعب محمد الجدي
m.aljdiee1@histr.edu.ly
المعهد العالي للعلوم والتقنية ؤقدالين - ليبيا

A Study on Reinforcing Steel Corrosion in Concrete and Remedial Methods

Abdulmutallab Muhammad Zayed Al-Maqrous
Mosab Mohammed Ahmed aljadi
Higher Institute of Science and Technology, Waddan – Libya

تاريخ الاستلام:2026/08/01 –تاريخ المراجعة:2026/08/09– تاريخ القبول: 2026/08/15– تاريخ للنشر:2026/9/17

الملخص

يُعد تآكل حديد التسليح من أخطر المشكلات التي تؤثر على متانة المنشآت الخرسانية المسلحة وعمرها الافتراضي, يحدث التآكل نتيجة فقدان الطبقة السلبية الواقية لحديد التسليح بسبب تأثير الكلوريدات أو الكربنة أو العوامل البيئية المختلفة، مما يؤدي إلى تكوين الصدأ وزيادة حجم الحديد المتآكل وحدوث تشققات وانفصال للغطاء الخرساني وانخفاض قدرة المنشأ على تحمل الأحمال, تهدف هذه الدراسة إلى توضيح أسباب وآليات تآكل حديد التسليح، وتأثيراته على المنشآت الخرسانية، وطرق الفحص والتقييم، إضافة إلى استعراض أحدث أساليب المعالجة والحماية المستخدمة في الهندسة المدنية.

كما أوضحت الدراسة أن التشخيص المبكر باستخدام الاختبارات غير المتلفة والفحوصات المخبرية يساهم في تقليل تكاليف الإصلاح وإطالة العمر الخدمي للمنشآت, وتبقى إجراءات الوقاية، مثل استخدام الخرسانة منخفضة النفاذية والحماية الكاثودية والتسليح المقاوم للتآكل، من أكثر الحلول فعالية لضمان استدامة المنشآت الخرسانية وتقليل الأضرار الاقتصادية والإنشائية الناتجة عن التآكل.

الكلمات المفتاحية: **تآكل - حديد - التسليح - الخرسانة .**

Abstract

Reinforcement corrosion is one of the most critical issues affecting the durability and service life of reinforced concrete structures. Corrosion occurs due to the loss of the protective passive layer on the reinforcement—triggered by chlorides, carbonation, or various environmental factors—leading to rust formation, expansion of the corroded steel, cracking and spalling of the concrete cover, and a reduction in the structure's load-bearing capacity. This study aims to elucidate the causes and mechanisms of reinforcement corrosion and its impact on concrete structures, as well as to examine inspection and assessment methods and review the latest repair and protection techniques employed in civil engineering.

The study also demonstrated that early diagnosis—utilizing non-destructive testing and laboratory analyses—contributes to reducing repair costs and extending the service life of structures. Furthermore, preventive measures such as the use of low-permeability concrete, cathodic protection, and corrosion-resistant reinforcement remain among the most effective solutions for ensuring the sustainability of concrete structures and minimizing the economic and structural damage caused by corrosion.

1.1المقدمة

تتميز الخرسانة المسلحة بقدرتها العالية على تحمل الأحمال نتيجة التكامل بين الخرسانة وحديد التسليح, وتوفر الخرسانة بيئة قلوية عالية (pH) يتراوح بين 12.5 و13.5تعمل على تكوين طبقة حماية طبيعية حول حديد التسليح تمنع حدوث التآكل.

إلا أن تعرض المنشآت للعوامل البيئية القاسية مثل الرطوبة والأملاح وثاني أكسيد الكربون يؤدي إلى تدمير هذه الطبقة الواقية وبدء عملية التآكل، مما يؤثر سلباً على سلامة المنشأ وأدائه الإنشائي.

2.1مشكلة الدراسة

آكل (صدأ) حديد التسليح داخل الخرسانة من أخطر المشاكل التي تؤثر على متانة المنشآت الخرسانية، لأنه يؤدي إلى فقدان مساحة مقطع الحديد وضعف الترابط بين الحديد والخرسانة، وقد يسبب تشققات وتقشر الغطاء الخرساني وانخفاض قدرة العنصر الإنشائية.
وأسباب تآكل حديد التسليح وصول الرطوبة والماء إلى الحديد بسبب نفاذية الخرسانة العالية أو وجود تشققات, وجود أملاح الكلوريد مثل أملاح مياه البحر أو الأملاح المستخدمة في إزالة الجليد أو المياه الجوفية المالحة, الكلوريدات تكسر طبقة الحماية الطبيعية حول الحديد, الكربنة (Carbonation) تفاعل ثاني أكسيد الكربون مع الخرسانة يخفض قيمة الـpH ، مما يفقد الحديد حمايته القلوية, قلة سمك الغطاء الخرساني تجعل الحديد أقرب للعوامل الجوية, رداءة جودة الخرسانة ارتفاع نسبة الماء إلى الإسمنت أو سوء الدمك والمعالجة, التيارات الكهربائية الشاردة في بعض المنشآت الصناعية أو القريبة من خطوط السكك الحديدية المكهربة .

3.1أهمية الدراسة

تكمن أهمية الدراسة في أن تآكل حديد التسليح يعد من أكثر أسباب تدهور المنشآت الخرسانية انتشاراً، حيث يؤدي إلى انخفاض قدرة العناصر الإنشائية على تحمل الأحمال وزيادة تكاليف الصيانة والترميم. كما تسهم الدراسة في رفع الوعي الهندسي بأهمية إجراءات الوقاية والصيانة الدورية لضمان استدامة المنشآت وتحقيق متطلبات السلامة.

4.1أهداف الدراسة

تهدف هذه الدراسة إلى تحقيق الأهداف التالية:

1. التعرف على آليات تآكل حديد التسليح داخل الخرسانة المسلحة .
2. تحديد العوامل المؤدية إلى بدء وانتشار التآكل .
3. توضيح تأثير التآكل على الأداء الإنشائي والعمر الافتراضي للمنشآت .
4. استعراض أهم الطرق المستخدمة في الكشف المبكر عن التآكل .
5. دراسة أساليب إصلاح العناصر الخرسانية المتضررة وإعادة تأهيلها .
6. عرض وسائل الحماية الوقائية الحديثة المستخدمة للحد من تآكل حديد التسليح .

5.1منهجية الدراسة

اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي من خلال مراجعة المراجع العلمية والكودات الهندسية المتخصصة في مجال تآكل حديد التسليح وصيانة المنشآت الخرسانية، وتحليل أسباب التآكل وآثاره وطرق معالجته وفقاً للممارسات الهندسية الحديثة والمواصفات العالمية.

6.1 هيكلية الدراسة

1.2 مفهوم تآكل حديد التسليح

التآكل هو عملية كهروكيميائية يتحول خلالها الحديد إلى أكاسيد وهيدروكسيدات الحديد (الصدأ) نتيجة تفاعله مع الأكسجين والرطوبة.
يمكن تبسيط التفاعل كما يلي:

- عند الأنود:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$$

- عند الكاثود:

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$$

- الناتج النهائي:

$$Fe(OH)_2 \rightarrow Fe_2O_3 \cdot H_2O \text{(الصدأ)}$$

ويتميز الصدأ بحجم أكبر من حجم الحديد الأصلي بما يصل إلى 6–8 مرات، مما يسبب ضغطاً داخلياً على الخرسانة.

2.2اختراق أيونات الكلوريد

تعتبر الكلوريدات من أهم أسباب التآكل، خاصة في: المناطق الساحلية, المنشآت البحرية, استخدام مياه أو مواد ملوثة بالأملاح, أملاح إزالة الجليد في بعض الدول,عندما يصل تركيز الكلوريد إلى حد معين عند سطح الحديد تنهار الطبقة السلبية الواقية ويبدأ التآكل.

3.2الكربنة(Carbonation)

تحدث الكربنة نتيجة تفاعل ثاني أكسيد الكربون مع هيدروكسيد الكالسيوم في الخرسانة:

$$CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$

وينتج عن ذلك انخفاض قيمة pH مما يؤدي إلى فقدان الحماية الطبيعية لحديد التسليح.

4.2 ضعف الغطاء الخرساني

نقص سمك الغطاء, وجود تعشيش وفراغات, سوء الدمك, التشققات المبكرة, كلها عوامل تسهل وصول الرطوبة والأكسجين إلى الحديد.

5.2 نفاذية الخرسانة العالية

6.2الظروف البيئية

تشمل: الرطوبة المرتفعة, تغير درجات الحرارة, المياه الجوفية المالحة, التلوث الصناعي .

1.3 مظاهر تآكل حديد التسليح

يُعد تآكل حديد التسليح من أكثر مظاهر التلف شيوعًا وخطورة في المنشآت الخرسانية المسلحة، ويحدث نتيجة فقدان الحديد لطبقة الحماية الطبيعية بسبب الكربنة أو اختراق أيونات الكلوريد، مما يؤدي إلى تكوّن الصدأ وزيادة حجمه مقارنة بالحديد الأصلي. وتظهر آثار التآكل على مراحل متتابعة .

2.3 ظهور بقع الصدأ على سطح الخرسانة

تُعتبر من أول العلامات المرئية للتآكل، حيث تظهر بقع بنية أو حمراء على سطح الخرسانة نتيجة انتقال نواتج الصدأ مع الرطوبة إلى السطح. وغالبًا ما تكون هذه البقع ممتدة في اتجاه أسياخ التسليح.

الدلالة :تشير إلى بدء تفاعل التآكل داخل العنصر الخرساني ووصول الرطوبة والأكسجين إلى الحديد.

3.3 حدوث تشققات طولية موازية للتسليح

عندما يتكون الصدأ يزداد حجمه عدة مرات مقارنة بحجم الحديد الأصلي، مما يولد ضغوطًا داخلية على الخرسانة المحيطة بالتسليح,ونظرًا لأن الخرسانة ضعيفة في مقاومة الشد، تبدأ بالتشقق.

خصائص هذه التشققات:

تكون موازية لاتجاه أسياخ التسليح, تبدأ دقيقة ثم تتسع تدريجيًا, قد تمتد لمسافات طويلة على سطح العنصر .

الدلالة :تدل على أن التآكل أصبح مؤثرًا على الخرسانة المحيطة بالحديد.

4.3انتفاخ الغطاء الخرساني

مع استمرار تراكم الصدأ تزداد الضغوط الداخلية، مما يؤدي إلى رفع الغطاء الخرساني تدريجيًا وظهور انتفاخات أو بروزات على السطح.

الدلالة :تشير إلى مرحلة متقدمة نسبيًا من التآكل وأن الصدأ أصبح يشغل حيزًا كبيرًا حول قضبان التسليح.

5.3تقشر وانفصال الغطاء الخرساني(Spalling)

عندما تتجاوز الضغوط الناتجة عن الصدأ قدرة الخرسانة على التحمل، تنفصل أجزاء من الغطاء الخرساني وتسقط.

مظاهرها: سقوط قطع خرسانية صغيرة أو كبيرة, ظهور فراغات حول الحديد, خشونة وعدم انتظام سطح الخرسانة .

الدلالة :مرحلة خطيرة لأن التسليح يفقد جزءًا من حمايته الطبيعية.

6.3 انكشاف حديد التسليح

بعد سقوط الغطاء الخرساني تصبح أسياخ التسليح ظاهرة للعين المجردة.

الملاحظات الشائعة: وجود طبقات صدأ كثيفة, تغير لون الحديد إلى البني الداكن أو الأحمر, ظهور حفر أو تآكل موضعي على سطح القضيب .

الدلالة :زيادة سرعة التآكل بسبب التعرض المباشر للجو والرطوبة.

7.3 نقص مساحة مقطع حديد التسليح

يؤدي استمرار التآكل إلى فقدان جزء من المعدن نفسه، وبالتالي يقل قطر القضيب ومساحة مقطعه.

النتائج: انخفاض مقاومة الشد, ضعف قدرة العنصر على تحمل الأحمال ,زيادة احتمالية الفشل الإنشائي .

الدلالة :من أخطر مظاهر التآكل لأنها تؤثر مباشرة على السلامة الإنشائية.

8.3 ضعف التماسك بين الحديد والخرسانة

الترابط بين الخرسانة والتسليح ضروري لنقل الإجهادات,ومع التآكل يتدهور هذا الترابط بسبب:

تشقق الخرسانة, تكوّن طبقات الصدأ, فقدان التلامس المباشر بين الحديد والخرسانة .

النتائج: زيادة الانزلاق بين الحديد والخرسانة, انخفاض كفاءة العنصر الإنشائي .

9.3 زيادة التشوهات والترخيم

عندما يفقد التسليح جزءًا من مقاومته تبدأ العناصر الخرسانية بإظهار تشوهات واضحة مثل:

زيادة انحناء الكمرات, هبوط البلاطات ,ظهور شروخ إنشائية أوسع .

الدلالة :مؤشر على تأثر قدرة التحمل الفعلية للعنصر.

10.3 انخفاض مقاومة ومتانة المنشأ

في المراحل المتقدمة يصبح التآكل سببًا في:انخفاض العمر الافتراضي للمنشأ, زيادة تكاليف الصيانة والترميم, احتمالية حدوث انهيارات جزئية أو كلية إذا لم تتم المعالجة .

11.3تسلسل تطور مظاهر التآكل

يمكن تلخيص تطور الحالة بالترتيب التالي:

ظهور الرطوبة والأملاح ← بدء صدأ الحديد ← بقع صدأ سطحية ← تشققات طولية ← انتفاخ الغطاء الخرساني ← تقشر الخرسانة ← انكشاف الحديد ← نقص قطر القضبان ← ضعف التماسك ← انخفاض المقاومة الإنشائية.

1.4 تأثير التآكل على المنشآت

التآكل هو عملية تدهور المواد، وخاصة المعادن، نتيجة تفاعلها مع البيئة المحيطة مثل الرطوبة والأكسجين والأملاح والمواد الكيميائية, ويُعد من أهم المشكلات التي تواجه المنشآت الهندسية والمباني والبنية التحتية.

2.4التأثيرات الرئيسية للتآكل

1. **انخفاض المقاومة الميكانيكية** يؤدي التآكل إلى فقدان جزء من سماكة المعدن, تقل قدرة العناصر الإنشائية على تحمل الأحمال, يزداد خطر حدوث التشققات أو الانهيار الجزئي .
2. **تلف حديد التسليح في الخرسانة** عندما يتآكل حديد التسليح يزداد حجمه بسبب تكوّن الصدأ, يسبب ذلك تشقق الخرسانة وتقشرها وانفصال الغطاء الخرساني ,تنخفض متانة وعمر المنشأ .
3. **زيادة تكاليف الصيانة والإصلاح** تتطلب العناصر المتآكلة أعمال فحص وصيانة دورية ,قد تستلزم استبدال أجزاء كاملة من المنشأة, ترتفع التكاليف التشغيلية على المدى الطويل .
4. **تأثيرات على السلامة** يمكن أن يؤدي التآكل الشديد إلى فشل مفاجئ في الجسور أو الأنابيب أو الخزانات أو الهياكل المعدنية, يشكل خطراً على المستخدمين والعاملين .
5. **تقليل العمر الافتراضي للمنشأة** يؤدي التآكل المستمر إلى تسريع تدهور العناصر الإنشائية, تصبح الحاجة إلى إعادة التأهيل أو الاستبدال مبكرة مقارنة بالعمر التصميمي المتوقع .

3.4العوامل التي تزيد من التآكل

عوامل التي تزيد من **التآكل (Corrosion)** تشمل:

- **وجود الرطوبة أو الماء** :الماء يساعد على حدوث التفاعلات الكيميائية والكهروكيميائية التي تؤدي إلى التآكل .
- **وجود الأكسجين** :يساهم في أكسدة المعادن، مثل صدأ الحديد .
- **ارتفاع درجة الحرارة** :يزيد من سرعة التفاعلات الكيميائية، وبالتالي يسرّع عملية التآكل .
- **الأملاح الذائبة** :مثل ملح الطعام (كلوريد الصوديوم)، إذ تزيد من موصلية الماء وتسرّع التآكل، لذلك تتآكل المعادن بسرعة أكبر في البيئات البحرية .
- **الأوساط الحمضية** :الأحماض تهاجم المعادن وتزيد من معدل التآكل .
- **التلوث الجوي** :غازات مثل ثاني أكسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين يمكن أن تذوب في الماء مكوّنة أحماض تسرّع التآكل .
- **التلامس بين معادن مختلفة** :عند اتصال معدنين مختلفين كهربائيًا في وجود إلكتروليت (مثل الماء المالح)، قد يحدث **التآكل الجلفاني** .
- **وجود الشقوق والترسبات** :قد تحتجز الرطوبة والأملاح وتؤدي إلى تآكل موضعي شديد .
- **الإجهادات الميكانيكية** :بعض المعادن تكون أكثر عرضة للتآكل عندما تتعرض لإجهادات أو أحمال مستمرة.

1.5طرق الحد من التآكل

التآكل هو تدهور المعادن نتيجة تفاعلها مع البيئة المحيطة، مثل الهواء والرطوبة والأملاح والمواد الكيميائية, يسبب خسائر اقتصادية كبيرة ويؤثر على سلامة المنشآت والمعدات, توجد عدة طرق للحد منه أو إبطائه.

2.5 اختيار المواد المناسبة

يُعد اختيار المعدن المناسب للبيئة التشغيلية من أهم وسائل مكافحة التآكل.

- استخدام معادن مقاومة للتآكل مثل : الفولاذ المقاوم للصدأ ,التيتانيوم, النيكل وسبائكه, الألومنيوم في بعض البيئات .
- اختيار السبائك التي تحتوي على عناصر تزيد المقاومة للتآكل مثل الكروم والنيكل و الموليبدينوم .

مثال :إضافة الكروم للفولاذ يؤدي إلى تكوين طبقة أكسيد رقيقة تحمي السطح من التآكل.

3.5 الطلاءات الواقية(Protective Coatings)

أ) الطلاءات العضوية مثل: الدهانات, الإيبوكسي, الورنيش, تعمل كحاجز يمنع وصول الماء والأكسجين إلى المعدن.

ب) الطلاءات المعدنية مثل:الجلفنة بالزنك, الطلاء بالقصدير, الطلاء بالنيكل أو الكروم ,تمنع الوسط المحيط من ملامسة المعدن الأساسي, **الجلفنة** من أكثر الطرق استخدامًا لحماية الحديد والصلب.

4.5 الحماية الكاثودية

(Cathodic Protection) تُستخدم بشكل واسع في:خطوط الأنابيب, خزانات الوقود, السفن, المنشآت البحرية .

الطريقة الأولى: الأنود المضحي يتم توصيل المعدن المراد حمايته بمعدن أكثر نشاطًا مثل:الزنك المغنيسيوم, الألومنيوم, فيتآكل المعدن المضحي بدلًا من المعدن الأساسي.

الطريقة الثانية: التيار المسلط يُستخدم مصدر كهربائي خارجي لتوفير تيار يجعل المعدن المراد حمايته كاثودًا فلا يتآكل.

5.5الحماية الأنودية

(Anodic Protection) تُستخدم لبعض المعادن التي تُكوّن طبقات أكسيد واقية عند تطبيق جهد كهربائي مناسب ,تُستخدم في:خزانات الأحماض, بعض الصناعات الكيميائية, تحتاج إلى تحكم دقيق في الجهد الكهربائي.

6.5 استخدام مثبطات التآكل

(Corrosion Inhibitors) هي مواد كيميائية تُضاف إلى الوسط المسبب للتآكل لتقليل معدل التفاعل ,أنواعها:مثبطات أنودية, مثبطات كاثودية, مثبطات عضوية, تستخدم في:أنظمة التبريد, الغلايات ,صناعة النفط والغاز .

7.5 التحكم في البيئة المحيطة

يمكن تقليل التآكل عبر تعديل الظروف البيئية مثل:

تقليل الرطوبة استخدام مزيلات الرطوبة, التخزين في أماكن جافة .

إزالة الأكسجين نزع الأكسجين من مياه الغلايات .

ضبط درجة الحموضة(pH) جعل الوسط أقل عدوانية تجاه المعدن .

تقليل تركيز الأملاح غسل المعدات المعرضة لمياه البحر, استخدام مياه معالجة .

8.5التصميم الهندسي الجيد

التصميم السيئ قد يزيد من احتمالية التآكل, من المبادئ المهمة:تجنب تجمع المياه والرطوبة, منع وجود الشقوق والفجوات الضيقة, توفير تصريف جيد للسوائل, تجنب ملامسة معادن مختلفة مباشرة عند الإمكان .

مثال :تلامس النحاس مع الفولاذ في وجود رطوبة قد يسبب تآكلًا جلفانيًا للفولاذ.

9.5 العزل بين المعادن المختلفة

عند الحاجة لربط معدنين مختلفين:استخدام حشوات عازلة, استخدام مواد بلاستيكية أو مطاطية فاصلة, منع مرور التيار الكهربائي بين المعدنين, وهذا يقلل من التآكل الجلفاني.

10.5المعالجة السطحية

تشمل عمليات مثل: الأكسدة الأنودية للألومنيوم, الفوسفاتة , التخميل (Passivation) , تؤدي إلى تكوين طبقات سطحية واقية تقلل من سرعة التآكل.

11.5الصيانة الدورية والمراقبة

تشمل:الفحص البصري المنتظم .قياس سمك المعدن, الكشف عن الشقوق والتآكل المبكر, إعادة الطلاء عند الحاجة, استبدال الأنودات المضحية المستهلكة, تساعد الصيانة المبكرة على تجنب الأعطال المكلفة والخطيرة.

1.6طرق الكشف عن التآكل

الكشف عن التآكل هو عملية تحديد **وجود التآكل، مكانه، شدته، ومعدل تطوره**, ويتم باستخدام طرق تقليدية ومتقدمة حسب نوع المنشأة (أنابيب، خزانات، سفن، هياكل معدنية),يمكن تقسيم الطرق إلى 5 مجموعات رئيسية.

2.6الفحص البصري المباشر(Visual Inspection)

الفكرة ملاحظة التغيرات الظاهرة على سطح المعدن,**ما يتم البحث عنه:**الصدأ(Rust) , تغير اللون (تلون بني/أسود/أخضر),فقاعات تحت الطلاء(Blistering) , تقشر الطلاء(Peeling) , حفر سطحية(Pitting) , تشققات .

أدوات مساعدة:عدسات مكبرة, كاميرات صناعية, مناظير داخل الأنابيب(Borescope) .

المميزات:سريع ورخيص, مناسب للفحص الأولي .

العيوب: لا يكشف التآكل الداخلي أو تحت السطحي, يعتمد على خبرة الفاحص .

3.6 الفحوصات غير الإتلافية(NDT)

وهي أهم مجموعة في الصناعة لأنها تكشف التآكل دون إتلاف المعدن.

أ) اختبار الموجات فوق الصوتية(Ultrasonic Testing - UT) المبدأ: إرسال موجات صوتية عالية التردد داخل المعدن وقياس انعكاسها ,**ماذا يكشف؟** نقص السمك(Wall thinning) , التآكل الداخلي في الأنابيب والخزانات, الفراغات الداخلية .

الميزة: دقة عالية جدًا في قياس السمك .
ب) اختبار الأشعة السينية أو جاما(Radiographic Testing) المبدأ: تمرير أشعة عبر المعدن وتسجيل الصورة على فيلم أو حساس رقمي, **يكشف:** التآكل الداخلي, الثقوب والفراغات, التشققات .
المميزات: صورة واضحة للعيوب .
العيوب: مكلف, يحتاج إجراءات سلامة إشعاعية .
ج) اختبار الجسيمات المغناطيسية(Magnetic Particle Testing) يستخدم لـ:
المعادن الحديدية فقط.**يكشف:**الشقوق السطحية, الشقوق تحت السطح القريبة, **المبدأ:**تمغنط السطح ثم إضافة جسيمات تتجمع عند العيوب.
د) اختبار السوائل المتغلغلة(Dye Penetrant Test) المبدأ:سائل ملون يتغلغل داخل الشقوق الدقيقة ثم يظهر عند استخدام مادة مظهرة,.**يكشف:**الشقوق السطحية فقط .
4.6 الطرق الكهروكيميائية(Electrochemical Methods)
هذه الطرق مهمة جدًا لأنها تقيس **معدل التآكل وليس فقط وجوده**.
أ) قياس الجهد نصف الخلوي(Half-Cell Potential) الفكرة:قياس فرق الجهد بين المعدن وقطب مرجعي, **الاستخدام:**تحديد احتمالية حدوث التآكل, تقييم حالة الخرسانة المسلحة .
ب) مقاومة الاستقطاب الخطية(Linear Polarization Resistance - LPR)
الفكرة:تمرير تيار صغير جدًا وقياس استجابة المعدن, **ماذا تعطي؟** معدل التآكل اللحظي(Corrosion Rate) .
ج) الضوضاء الكهروكيميائية(Electrochemical Noise) الفكرة:رصد تغيرات عشوائية في الجهد والتيار, **الاستخدام:**كشف بداية التآكل النشط (Early corrosion) .
5.6 قياس السمك والمراقبة الميدانية
أ) أجهزة قياس السمك بالموجات فوق الصوتية المبدأ: قياس زمن رجوع الموجة لتحديد السمك.**الاستخدام:**مراقبة الأنابيب والخزانات, **الميزة:**مقارنة السمك الحالي بالسمك الأصلي لمعرفة معدل التآكل .
ب) شرائح المراقبة(Corrosion Coupons) الفكرة: وضع قطعة معدن داخل النظام ثم قياس فقدان وزنها, **ماذا تعطي؟** معدل التآكل الفعلي في البيئة .
ج) المجسات الإلكترونية(Corrosion Probes)
الأنواع:

- Electrical Resistance (ER) Probes.
- Linear Polarization Probes.

الاستخدام: مراقبة مستمرة داخل الأنظمة الصناعية .
6.6التحليل الكيميائي ومراقبة البيئة
ما يتم قياسه: درجة الحموضة(pH) , نسبة الأكسجين الذائب, الكلوريدات والأملاح, الحديد الذائب / Fe^{2+}) (Fe^{3+}, **لماذا مهم؟** لأن التآكل يعتمد بشكل كبير على البيئة وليس المعدن فقط.
7.6 تقنيات متقدمة وحديثة
أ) التصوير الحراري(Thermography) الفكرة اختلافات الحرارة تكشف مناطق ضعف أو تآكل, **لاستخدام** المعدات الكهربائية, الهياكل الكبيرة .
ب) الذكاء الاصطناعي والتنبؤ كيف يعمل حساسات تجمع بيانات مستمرة, تحليل البيانات لاكتشاف نمط التآكل, لتنبؤ بالفشل قبل حدوثه .
ج) الفحص الداخلي الذكي(Smart PIGs) الاستخدام في خطوط الأنابيب, **الوظيفة** تمر داخل الأنبوب وتكشف التآكل, التشققات, فقدان السمك .
1.7طرق علاج تآكل حديد التسليح
آكل حديد التسليح داخل الخرسانة من أخطر المشكلات في المنشآت الخرسانية، لأنه يؤدي إلى:
تشقق وتفتت الخرسانة, فقدان التماسك بين الحديد والخرسانة, ضعف مقاومة المنشأ وقد يصل إلى انهيار جزئي أو كلي, علاج التآكل يعتمد على **تشخيص الحالة أولاً** ثم اختيار طريقة الإصلاح المناسبة حسب شدة الضرر.
2.7 إصلاحات سطحية وخفيفة (في المراحل المبكرة)
1.إزالة الخرسانة المتضررة وإعادة الترميم(Patch Repair)
الخطوات: تكسير وإزالة الخرسانة المتشققة حول الحديد,تنظيف حديد التسليح من الصدأ بفرشاة سلكية أو(sandblasting), تطبيق مادة مانعة للصدأ(Rust Inhibitor) , إضافة طبقة رابطة(Bonding Agent) , إعادة ملء المنطقة بمونة إصلاح(Repair Mortar) .
الاستخدام:التآكل السطحي أو الموضعي(Localized corrosion) .
الميزة:حل مباشر وفعّال للأضرار المحدودة .
2.7استخدام مواد مانعة للتآكل(Corrosion Inhibitors)

الفكرة:إضافة مواد كيميائية تقلل نشاط التآكل حول الحديد.
أمثلة:نيتريت الكالسيوم(Calcium Nitrite) , مثبطات عضوية .
طريقة التطبيق: تُضاف للخرسانة الجديدة أو تُحقن في الخرسانة القديمة .
المميزات: تبطئ التآكل دون تكسير كبير .

3.7 إصلاحات متوسطة (عند وجود تآكل واضح)

1.إعادة تغليف الخرسانة(Recasting / Jacketing)

الفكرة:إضافة طبقة خرسانية جديدة حول العنصر المتضرر.
الخطوات:إزالة الجزء المتضرر, تنظيف الحديد أو استبداله جزئياً, إضافة تسليح جديد إذا لزم الأمر, صب خرسانة جديدة أوShotcrete .
الاستخدام:الأعمدة والكمرات المتضررة بشكل متوسط .

2 .حماية الحديد بعد التنظيف(Repassivation)

الفكرة: إعادة تكوين طبقة حماية طبيعية على سطح الحديد.
كيف يتم:تنظيف الحديد جيدًا, تطبيق مواد قلوية أو مثبطات, إعادة بيئة قلوية مناسبة داخل الخرسانة .

4.7 أنظمة الحماية الكهروكيميائية (الأكثر فعالية)

1 .الحماية الكاثودية(Cathodic Protection)

الفكرة: جعل حديد التسليح كاثودًا لمنع تفاعله الكيميائي.
النوع الأول: الأنودات المضحية استخدام زنك أو مغنيسيوم, يتآكل الأنود بدل الحديد .
2. التيار المسلط توصيل تيار كهربائي خارجي, التحكم في الجهد لمنع التآكل .
الاستخدام:الجسور, الموانئ, الهياكل البحرية .
المميزات:حماية طويلة الأمد جدًا.

1.8 طرق الحماية المستقبلية

2.8زيادة سمك الغطاء الخرساني

الغطاء الخرساني هو المسافة بين سطح الخرسانة وحديد التسليح, وزيادته تُعد من أهم وسائل **حماية الحديد من التآكل** وتحسين عمر المنشأ.

1.2.8 نزيد سمك الغطاء الخرساني

1. حماية حديد التسليح من التآكل تقليل وصول الماء , الأكسجين ,الكلوريدات, (خصوصًا في المناطق البحرية).
2. إبطاء وصول العوامل الضارة كلما زاد الغطاء، زادت المسافة التي يجب أن تخترقها المواد المسببة للتآكل.
3. تحسين مقاومة الحريق الغطاء يعمل كعازل حراري يحمي الحديد عند ارتفاع درجات الحرارة .
4. زيادة عمر المنشأ يؤخر بداية التآكل (Initiation Phase) بشكل كبير .

2.2.8كيف تعمل زيادة الغطاء ضد التآكل؟

التآكل يحتاج إلى : ماء + أكسجين + أملاح (كلوريد) عندما يكون الغطاء كبيرًا: تقل سرعة وصول هذه المواد إلى الحديد, يقل تركيز الكلوريدات عند سطح الحديد, يتأخر بدء التفاعل الكهرو كيميائي للتآكل .

3.2.8 القيم القياسية لسمك الغطاء

1. بيئة داخلية جافة20إلى 25 مم
2.بيئة عادية (مباني سكنية) 25 إلى 40 مم
3.بيئة رطبة أو معرضة للأمطار 40إلى 50 مم
4.بيئة بحرية أو شديدة العدوانية 50إلى 75 مم أو أكثر

4.2.8متى نلجأ لزيادة الغطاء الخرساني؟

1. المنشآت الساحلية مثل الجسور والموانئ
2. المناطق ذات الأملاح العالية التربة المالحة أو المياه الجوفية المالحة
3.المنشآت الصناعية التي تحتوي على مواد كيميائية
4. تحسين تصميم عمر المنشأ عند الحاجة لعمر خدمة طويل (50–100 سنة)

5.2.8طرق تنفيذ زيادة الغطاء

1. في التصميم (أفضل حل) يتم تحديد الغطاء الأكبر منذ البداية .
2. أثناء التنفيذ استخدام فواصل (Spacers) لضبط موقع الحديد, التأكد من عدم تحرك الحديد أثناء الصب .
3. في أعمال الترميم(Retrofit) إضافة طبقة خرسانة جديدة(Jacketing) , استخدام Shotcrete لزيادة السمك .

6.2.8مميزات زيادة الغطاء

تقليل سرعة التآكل, تحسين مقاومة الحريق, زيادة العمر الافتراضي, تقليل تكاليف الصيانة المستقبلية .

7.2.8 عيوب زيادة الغطاء إذا زاد عن الحد

1.زيادة عرض الشقوق لأن الخرسانة السطحية تكون أقل تقييدًا .

2.ضعف التحكم في التآكل الداخلي إذا كانت الخرسانة ضعيفة الجودة

3.زيادة الوزن والتكلفة.

4. تقليل كفاءة التسليح في بعض الحالات الإنشائية.

8.2.8 العلاقة بين الغطاء والتآكل

- كلما زاد الغطاء ← تأخر التآكل
- لكن إذا كانت الخرسانة مسامية ← حتى الغطاء الكبير لا يكفي .

لذلك الغطاء وحده ليس كافيًا، بل يجب:خرسانة منخفضة النفاذية جودة تنفيذ عالية عزل وحماية إضافية .

3.8استخدام خرسانة منخفضة النفاذية

لخرسانة منخفضة النفاذية هي خرسانة مصممة بحيث تكون **صعبة الاختراق للماء والغازات والأملاح (خصوصًا الكلوريدات)**، وبالتالي تُعد من أهم وسائل **حماية حديد التسليح من التآكل** وزيادة عمر المنشآت.

1.3.8النفاذية (Permeability)

هي قدرة الخرسانة على: مرور الماء مرور الأكسجين مرور أيونات الكلوريد والكبريتات

كلما كانت النفاذية أعلى ← زادت سرعة التآكل

كلما كانت أقل ← زادت الحماية

2.3.8 لماذا نستخدم خرسانة منخفضة النفاذية؟

1.حماية حديد التسليح تمنع وصول :الماء الأكسجين الأملاح (Cl^-) .

2. تأخير بدء التآكل التآكل لا يبدأ إلا عند وصول الكلوريدات للحديد، والخرسانة منخفضة النفاذية تؤخر ذلك كثيرًا.

3.تقليل التآكل الداخلي تمنع انتشار المواد العدوانية داخل الكتلة الخرسانية .

4.زيادة عمر المنشأ قد ترفع العمر التصميمي من 50 سنة إلى 100 سنة أو أكثر .

3.3.8 كيف نحصل على خرسانة منخفضة النفاذية؟

1.تقليل نسبة الماء إلى الأسمنت(w/c ratio) أهم عامل على الإطلاق

- كلما قلت نسبة الماء ← قلت الفراغات الشعرية (Capillary pores)

القيم المثالية0.35 **:**إلى 0.45 (للخرسانة عالية الجودة)

2.استخدام إضافات معدنية(Supplementary Cementitious Materials)

أ) السيليكا فيوم(Silica Fume) تقلل الفراغات الدقيقة جدًا ,تزيد كثافة الخرسانة .

ب) الرماد المتطاير(Fly Ash) يحسن التشغيلية ,يقلل النفاذية على المدى الطويل.

ج) خبث الأفران(Slag) مقاومة عالية للكبريتات ,يقلل التآكل في البيئات البحرية .

3. تحسين الدمك(Compaction) الفكرة: إزالة الفراغات الهوائية داخل الخرسانة.

الطريقة:استخدام الهزاز (Vibrator) بشكل صحيح .

النتيجة: تقليل المسامات التي تسمح بدخول الماء .

4.المعالجة الجيدة(Curing) لماذا مهمة؟ لأن الخرسانة غير المعالجة جيدًا تصبح مسامية

الطرق: المياه المستمرة , الأغطية الرطبة ,المركبات الكيميائية (Curing compounds) .

5.استخدام إضافات كيميائية

أمثلة: مواد مقللة للماء (Water reducers) , ملدنات فائقة (Superplasticizers) .

فائدتها: تقليل الماء مع الحفاظ على قابلية التشغيل .

6.تحسين التدرج الحبيبي(Aggregate Gradation) استخدام تدرج جيد للركام ,يقلل الفراغات بين الحبيبات .

4.3.8 خصائص الخرسانة منخفضة النفاذية

كثافة عالية, مسامية منخفضة, امتصاص ماء, قليل مقاومة, عالية للكلوريدات ,مقاومة جيدة للكبريتات .

5.3.8 اختبار النفاذية

1. اختبار امتصاص الماء قياس كمية الماء التي تدخل الخرسانة .

2.اختبار الكلوريد(Rapid Chloride Permeability Test - RCPT) يقيس سهولة مرور أيونات الكلوريد .

3.اختبار النفاذية تحت الضغط قياس تسرب الماء تحت ضغط معين .

6.3.8أين تستخدم الخرسانة منخفضة النفاذية؟

1.المنشآت البحرية الموانئ ,الأرصفة .

2.الجسور ,خاصة الكمرات والأسطح .

3.الخزانات مياه أو مواد كيميائية .
4.الأساسات في التربة المالحة.
5.محطات معالجة المياه والصرف.

8.3.7علاقتها بتآكل حديد التسليح

التآكل يحتاج إلى: ماء + أكسجين + كلوريدات الخرسانة منخفضة النفاذية : تقلل وصول هذه العناصر إلى الحديد تؤخر بدء التآكل (Initiation phase) تقلل سرعة انتشار التآكل (Propagation phase) .

8.3.8 أخطاء تقلل فعالية الخرسانة منخفضة النفاذية

زيادة الماء أثناء الصب, سوء الدمك ,.ضعف المعالجة, استخدام مواد رديئة, تشققات سطحية دون معالجة .

4.8 استخدام الإضافات المعدنية

استخدام بعض الإضافات المعدنية للوقاية من تآكل الحديد أو تقليل معدل الصدأ, من أشهر الطرق:

1. **إضافة الكروم والنيكل** إلى الحديد لتكوين الفولاذ المقاوم للصدأ، حيث تتكون طبقة رقيقة واقية على السطح تمنع التآكل .
2. **الجلفنة بالزنك،** وهي تغطية الحديد بطبقة من الزنك تعمل كحاجز واقٍ وتتآكل قبل الحديد .
3. **إضافة عناصر سبائكية أخرى** مثل الموليبدينوم أو النحاس في بعض التطبيقات الخاصة لزيادة مقاومة التآكل .

تعمل هذه الإضافات إما على تكوين طبقة واقية تمنع وصول الأكسجين والرطوبة إلى الحديد، أو على جعل المعدن نفسه أكثر مقاومة للتآكل..

5.8استخدام مثبطات التآكل

استخدام مثبطات التآكل هو إحدى طرق حماية الحديد من الصدأ والتآكل, مثبطات التآكل هي مواد كيميائية تُضاف إلى الوسط المحيط بالمعدن (مثل الماء أو الزيوت أو المحاليل الصناعية) فتقلل من سرعة التفاعلات الكيميائية المسببة للتآكل، وذلك عن طريق تكوين طبقة واقية على سطح الحديد أو إبطاء التفاعلات الكهروكيميائية.

النتيجة :تساعد مثبطات التآكل على إطالة عمر الحديد وتقليل الصدأ وخفض تكاليف الصيانة.

6.8 التسليح المطلي بالإيبوكسي

التسليح المطلي بالإيبوكسي هو حديد تسليح يُغطى بطبقة من مادة الإيبوكسي لحمايته من التآكل والصدأ.

آلية الحماية: تعمل طبقة الإيبوكسي كحاجز يمنع وصول الماء والأكسجين والأملاح إلى سطح الحديد, يقلل ذلك من احتمالية حدوث التآكل، خاصة في البيئات الرطبة أو المعرضة للأملاح .

الاستخدامات الشائعة: الجسور, المنشآت البحرية, مواقف السيارات, المنشآت المعرضة لأملاح إزالة الجليد أو المياه المالحة .

الميزة الرئيسية :زيادة عمر حديد التسليح وتحسين متانة المنشأة الخرسانية من خلال تقليل تآكل الحديد.

7.8الحديد المجلفن

الحديد المجلفن هو حديد أو فولاذ يُغطى بطبقة من الزنك لحمايته من التآكل والصدأ.

آلية الحماية: تشكل طبقة الزنك حاجزًا يمنع وصول الرطوبة والأكسجين إلى الحديد, إذا تعرض السطح لخدش بسيط، فإن الزنك يتآكل أولًا ويحمي الحديد تحته، لذلك يُسمى أحيانًا "الحماية التضحية ."

المزايا: مقاومة جيدة للصدأ والتآكل, عمر خدمة طويل, تكلفة صيانة منخفضة مقارنة بالحديد غير المحمي .

الاستخدامات: الأنابيب والخزانات ,الأسوار والأعمدة, الهياكل المعدنية الخارجية, بعض عناصر البناء والإنشاءات المعرضة للعوامل الجوية, لذلك يُعد **الجلفنة** من أكثر الطرق شيوعًا وفعالية لحماية الحديد من التآكل.

8.8الحماية الكاثودية

الحماية الكاثودية هي تقنية تُستخدم لمنع تآكل الحديد والصلب بجعل المعدن المراد حمايته يعمل كـ **كاثود** في خلية كهروكيميائية، مما يمنع فقدانه للإلكترونات وبالتالي يمنع التآكل.

طرق الحماية الكاثودية

1. **الأنود المضحي (Sacrificial Anode)** يُوصَل الحديد بمعدن أكثر نشاطًا مثل الزنك أو المغنيسيوم, يتآكل هذا المعدن بدلًا من الحديد، فيحميه من الصدأ .

2.التيار المسلط (Impressed Current) يُستخدم مصدر تيار كهربائي خارجي مع أقطاب خاصة .

الاستخدامات خطوط الأنابيب المدفونة تحت الأرض, خزانات الوقود والمياه ,الهياكل البحرية والسفن, الأرصفة والمنشآت البحرية .

الميزة الرئيسية تُعد الحماية الكاثودية من أكثر الطرق فعالية لإطالة عمر المنشآت المعدنية المعرضة للرطوبة أو التربة أو مياه البحر، حيث تقلل التآكل بشكل كبير.

9.8العزل السطحي

العزل السطحي هو إحدى طرق حماية الحديد من التآكل، ويتم عن طريق تغطية سطح المعدن بطبقة عازلة تمنع وصول العوامل المسببة للصدأ مثل الماء والأكسجين والأملاح إلى سطح الحديد.
وسائل العزل السطحي الطلاء بالدهانات الواقية, الطلاء بالإيبوكسي, التغطية بالبلاستيك أو المواد البوليمرية, الطلاء بالبيتومين أو المواد العازلة الأخرى .
المزايا تقليل أو منع التآكل والصدأ, زيادة العمر الافتراضي للمنشآت المعدنية, سهولة التطبيق وانخفاض التكلفة نسبيًا .
الاستخدامات حديد التسليح في بعض البيئات العدوانية, الأنابيب والخزانات المعدنية, الجسور والهياكل الفولاذية, المعدات الصناعية المعرضة للرطوبة والمواد الكيميائية .
الخلاصة :يعتمد العزل السطحي على إنشاء حاجز واقٍ يفصل الحديد عن البيئة المحيطة، مما يقلل بشكل كبير من فرص حدوث التآكل.

1.9 دراسة حالة مختصرة

1.9معلومات المشروع

- **نوع المنشأ :**مبنى سكني (4 طوابق)
- **الموقع :**منطقة ساحلية (رطوبة عالية + أملاح بحرية)
- **العمر الإنشائي عند ظهور المشكلة** 10–7 **:**سنوات
- **العنصر المتضرر :**الأعمدة والبلاطات الخارجية

3.9أظهرت الاختبارات المشاكل التالية

- ارتفاع تركيز الكلوريدات .
- انخفاض الغطاء الخرساني .
- فقدان جزء من مقطع الحديد .

4.9تم تنفيذ الإجراءات المعالجة التالية

1. إزالة الخرسانة التالفة .

2. تنظيف التسليح بالسفع الرملي .

3.إضافة أسياخ تعويضية .

4-دهان لحديد بمادة مانعة للتآكل .

5-إعادة الترميم بمونة إصلاح عالية المقاومة .

6-تطبيق طبقة حماية سطحية .

5.9الخلاصة

تآكل حديد التسليح يحدث غالبًا بسبب الرطوبة والأملاح، ويمكن الحد منه بتحسين جودة الخرسانة وزيادة الحماية السطحية للتسليح.

1.10 النتائج

1. تآكل حديد التسليح من أهم أسباب تدهور المنشآت الخرسانية .
2. الكلوريدات و الكربنة يمثلان العاملين الرئيسيين للتآكل .
3. الكشف المبكر يقلل تكاليف الإصلاح بشكل كبير .
4. جودة الخرسانة وسمك الغطاء الخرساني عنصران أساسيان للحماية .
5. الحماية الكاثودية من أكثر الطرق فعالية للمنشآت المعرضة للبيئات العدوانية .

2.10 التوصيات

بناءً على دراسة أسباب تآكل حديد التسليح وطرق تشخيصه ومعالجته، يمكن صياغة التوصيات النهائية للدراسة كما يلي:

1. **إجراء فحص دوري للمنشآت الخرسانية**، خصوصًا العناصر المعرضة للرطوبة ومياه البحر والأملاح، للكشف المبكر عن الشروخ والبقع الصدئية والتقشر وانفصال الغطاء الخرساني .
2. **تحديد سبب التآكل قبل اختيار طريقة العلاج؛** فلا يكفي إزالة الخرسانة المتضررة وإعادة ترميمها، بل يجب تحديد ما إذا كان السبب هو الكلوريدات، أو الكربنة، أو تسرب المياه، أو سوء جودة الخرسانة .
3. **إجراء الاختبارات اللازمة لتقييم حالة العنصر**، مثل قياس عمق الكربنة، محتوى الكلوريدات، جهد نصف الخلية، مقاومة الخرسانة الكهربائية، وقياس مقدار فقدان مساحة مقطع حديد التسليح عند وجود تآكل واضح .
4. **إزالة الخرسانة المتضررة بالكامل** حتى الوصول إلى خرسانة سليمة، مع تنظيف حديد التسليح من نواتج الصدأ بطريقة مناسبة، ثم إعادة بناء الغطاء باستخدام مواد إصلاح متوافقة مع الخرسانة الأصلية .
5. **عدم الاكتفاء بتنظيف الحديد إذا كان فقدان مقطعه مؤثرًا إنشائيًا؛** ففي هذه الحالة يجب إجراء تقييم إنشائي، وقد يلزم إضافة أو استبدال تسليح وفق تصميم هندسي يضمن أطوال التماسك والوصلات المطلوبة .
6. **استخدام مواد حماية سطحية مناسبة بعد الإصلاح** للحد من دخول الماء والكلوريدات والملوثات إلى الخرسانة، مثل المواد السدادة والطلاءات الواقية والأغشية المناسبة .
7. **في المنشآت المتضررة من الكلوريدات على نطاق واسع**، ينبغي دراسة وسائل متقدمة مثل الحماية الكاثودية أو الاستخلاص الكهروكيميائي للكلوريدات، بدل الاقتصار على الإصلاح الموضعي .
8. **تحسين جودة الخرسانة في المنشآت الجديدة** من خلال تقليل النفاذية، وضبط نسبة الماء إلى الأسمنت، وتحقيق الدمك والمعالجة الجيدة، مع توفير الغطاء الخرساني المناسب للظروف البيئية. وقد أظهرت دراسات FHWA أن الخرسانة منخفضة النفاذية تساعد على تأخير وصول الكلوريدات والرطوبة إلى التسليح .

9. **استخدام أنظمة تسليح مقاومة للتآكل في البيئات شديدة العدوانية**، مثل حديد التسليح المجلفن أو المقاوم للتآكل أو المطلي، أو المواد البديلة المناسبة حسب طبيعة المنشأ والتعرض البيئي .
10. **معالجة مصادر الرطوبة وتسرب المياه** وتحسين تصريف المياه حول العناصر الخرسانية، لأن منع وصول الرطوبة والأملاح يمثل جزءًا أساسيًا من استراتيجية الحد من استمرار التآكل .
11. **وضع خطة صيانة ومراقبة طويلة الأمد** بعد تنفيذ الإصلاح، بحيث تتم إعادة الفحص على فترات محددة للتأكد من توقف أو انخفاض معدل التآكل وعدم ظهور شروخ أو تقشر جديد .
12. **إجراء تقييم اقتصادي قبل اختيار طريقة الإصلاح**، بحيث تتم مقارنة تكلفة الإصلاح الحالي مع تكاليف الصيانة المستقبلية والعمر المتوقع للمنشأ؛ فاختيار نظام الحماية يجب أن يعتمد على دورة حياة المنشأ وليس على التكلفة الأولية فقط .

المراجع

1.الجبوري، ح. م. (2014). *أضرار التآكل في المنشآت الخرسانية وإجراءات المعالجة* .مجلة الهندسة المدنية، جامعة بغداد .

2.مصطفى، أ. س. (2016). *تأثير الكلوريدات على حديد التسليح في الخرسانة المسلحة* .مجلة الهندسة والتكنولوجيا .

3.سراج صالح اونيس & ,نسيم صالح اونيس. (2026). تاثير الاستبدال الجزئي للإسمنت البورتلاندي العادي بمسحوق مخلفات الرخام المحلي علي قابلية التشغيل و مقاومة الضغط للخرسانة .*مجلة العلوم الشاملة* ,(39)*10* , 1455-1472.
DOI: https://doi.org/10.65405/e05kcb69

4. عبدالرحمن محمد عوض & ,نضال عبدالسلام خلف الله. (2025). دراسة مقاومة الصدم للخرسانة الذاتية الدمك. *مجلة العلوم الشاملة*. ISSN 2518-5799, *9*(35), , **https://drive.google.com/file/d/1SJb31WG3Z8WXdCteetFHnwVR3lB7D-Tq/view**

5. سعاد محمد المبروك محمد. (2024). دراسة تأثير احلال مخلفات الرخام والزجاج علي مقاومة الضغط لمونة الاسمنت. *مجلة العلوم الشاملة*. ISSN 2518-5799, *9*(33), , **https://drive.google.com/file/d/131EuciBLFWHHdnM8uNLH783IjvHRSs84/view**

6. سمير فوزي العزابي & ,محمد عاشور عيواز. (2025). تقيم تأثير تغير الحرارة اليومية علي الخرسانة الشفافة بالألياف البصرية البلاستيكية . *مجلة العلوم الشاملة*. ISSN 2518-5799, *9*(35), , **https://drive.google.com/file/d/1y6s5KzT-a8zD11VjkvPOdqBs_X7aN3GE/view**

7. سعاد محمد المبروك محمد. (2025). دراسة تأثير احلال مسحوق الحجر الجيري كبديل الاسمنت علي التشغيلية و مقاومة الضغط للمونة الاسمنتية. *مجلة العلوم الشاملة*. ISSN 2518-5799, *9*(35), , **https://drive.google.com/file/d/1DvrP3gsWSe0kfQmyIgrqqTgJC1b6hFia/view**

8.ACI 222R – Protection of Metals in Concrete Against Corrosion.
9.ACI 562 – Code Requirements for Assessment, Repair and Rehabilitation of Existing Concrete Structures.
10.BS EN 1504 – Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures.
11.Neville, A.M. – Properties of Concrete.
12.Broomfield, J.P. – Corrosion of Steel in Concrete.
13.PCA – Design and Control of Concrete Mixtures.
14.fib Bulletin – Model Code for Service Life Design.
15. Al-Arabi, F. M. Y. (2026). The Theory of Arbitrariness in the Use of the Right in Islamic Jurisprudence and Civil Law A Comparative Analytical Study in the Light of Modern Legislative Controls. *Shihab Journal of Humanities*, *2*(2), 102.
. (2026). Rapid Urban Growth and its Impact on أحمد الهادي مفتاح المخرم16. Sustainable Planning Case Study: Al-Khums City. *Shihab Journal of Humanities*, *2*(2), 51-97.

17. المجلة الشاملة للعلوم (2025). An Experimental Study on Submerged AWJ Turning and its Influence on castamide Machining. مجلة العلوم الشاملة, *10*(37), 880-894.
18. Elhebshi, Y., & Alsuwaye, A. (2026). A reactive core-shell nanoparticles synthesis, properties and applications in rubber materials. مجلة العلوم الشاملة, *10*(39), 3041-3061.
19. Ramdan, I. I., Ehzazat, S. S. W., Sheggaf, Z. M., & Elghanudi, M. M. (2025). Effect of Heattreatment on mechanical properties of recycled Aluminum-Piston Alloy. مجلة العلوم الشاملة, *10*(38), 2215-2222.
20. Khalifa, A. E. B. H. H. (2025). An Investigation into Fatigue Sensor Design and Modeling. مجلة العلوم الشاملة, *10*(37), 2858-2883.
21. Elgandoz, H., Elfantazi, M., & Aboulgasem, G. J. (2026). Cost-Effective Recycling of Spent Engine Oil for Lubricant Recovery Using a Simplified Purification Process. *مجلة العلوم الشاملة*, *10*(39), 548-554.
22. Elhebshi, Y., & Alsuwaye, A. (2026). A reactive core-shell nanoparticles synthesis, properties and applications in rubber materials. *مجلة العلوم الشاملة*, *10*(39), 3041-3061.
23. Hamad, H. F. M., Dalla, L. O. B., Essgaer, M., & Ali, A. M. O. (2026). Predictive Pavement Management for Strategic Transport Corridors: AI-Based Early Detection and Mitigation of Potholes on the Sabha-Ash-Shuwayrif Highway, Libya. *Al-Farooq Journal of Sciences*, *2*436-417 ,(3 ملحق).
24. Jetlawei, S. S., Dalla, L. O. B., Karal, Ö., Degirmenci, A., EL-sseid, M. A. M., Essgaer, M., & Alsharif, A. (2025). Temporal Intelligence and Algorithmic Equity: A Multi-Phase Framework for Predictive Student Success in Higher Education. *مجلة العلوم الشاملة*, *9*(36), 1574-1595.
25. Albaraesi, M. J. S., Ali, M. A. M. A., Dalla, L. O. B., EL-sseid, M. A. M., Medeni, T. D., Medeni, İ. T., & Alnnale, T. (2025). Random construction in the city of Al-Bayda during the period 2011-2022 and its irregular expansion and its impact on the urban landscape. *مجلة العلوم الشاملة*, *10*2614-2590 ,(38 ملحق).
26. ALKLABI, F. A. A. (2025). Perovskite–Quantum Dot Structures in Solar Cells: Materials, Properties and Emerging Trends. *مجلة العلوم الشاملة*, *10*2109-2099 ,(38 ملحق).
27. Abushawashi, H. A. (2026). The Influence of Age on Second Language Acquisition and Fossilization: A Review of Previous Studies. *مجلة العلوم الشاملة*, *11* (ملحق 389-368 ,(41.
28. Eisay, Y. M. A. (2026). Thermo-Mechanical Analysis and Process Optimization of Sand Casting for Aluminum Alloy Components: A General Mechanics Study. *مجلة العلوم الشاملة*, *10*1188-1178 ,(39 ملحق).
29. ALKLABI, F. A. A. (2025). Perovskite–Quantum Dot Structures in Solar Cells: Materials, Properties and Emerging Trends. *مجلة العلوم الشاملة*, *10*2109-2099 ,(38 ملحق).
30. Abuitayma, R. A. A. (2025). Analysis of Solar Energy Efficiency and its Applications in Sustainable Electricity Production. *مجلة العلوم الشاملة*, *10*-1432 ,(38 ملحق) 1438.
31. Alkamal, A. H. (2026). Business Process Re-engineering: A Holistic Framework for Radical Organizational Transformation in the Digital Era. *مجلة العلوم الشاملة*, *11* (ملحق 603-592 ,(41.
32. Albakoush, R. A., Azab, A. E., & Eltome, A. E. (2026). Prediction of Preeclampsia Using Maternal Factors, Biochemical Markers, and Uterine Artery Doppler. *مجلة العلوم الشاملة*, *11*(41), 777-784.

33. Esherwi, H. A. A. (2026). Design and Implementation of a Low-Cost Wireless Hand-Gesture-Controlled Wheelchair Using MPU6050 and NRF24L01. *مجلة العلوم الشاملة*, *10*(39), 390-400.
34. Embark, J. A., Dokhan, M. R., & Khanfas, Y. A. (2025). EVALUATION OF FEEDING MORINGA LEAVES AND GINGER POWDER ON PRODUCTIVE PERFORMANCE, BLOOD BIOCHEMICAL PARAMETERS, AND ANTIOXIDANT STATUS OF JAPANESE QUAIL. *مجلة العلوم الشاملة*, *10*(37), 759-775.