

## أسباب تآكل فولاذ التسليح في المنشآت البيتونية المسلحة تأثير تشقق البيتون والحد من التآكل

الدكتور منير الأطرش\*

(قبل للنشر في 1996/12/3)

### □ الملخص □

يعتبر صدأ فولاذ التسليح وتآكله شائعاً وخطيراً يؤثر على تحمل المنشآت البيتونية المسلحة. بعد تحليل الأسباب المؤدية إلى صدأ فولاذ التسليح وتآكله في المنشآت البيتونية المسلحة وبالتركيز على السبب الأهم -تشققات البيتون- من خلال بحث مخبري، أجري على عدد من العينات لجوائز بيتونية مسلحة باستعمال بيتون من نوعيات مختلفة. أشارت النتائج أن الشقوق تزيد من نفاذية العوامل المؤثرة، وتؤدي إلى نقص فترة بداية التآكل. لكن امتداد أذى التآكل كان يعتمد بشكل كبير على نوعية البيتون، فقد أثبت البيتون -عالي الجودة- ( $w/c < 0.50$ ) قدرته على حماية فولاذ التسليح من التآكل، حيث ظهر على فولاذ التسليح في هذه العينات المخبرية تآكل سطحي فقط، غير مؤذ. ولم يكن هناك تأثير واضح لسعة الشق على أذى التآكل وعلى نفاذية العوامل الضارة.

\* مدرس في قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## Corrosion of steel reinforcement is the most widespread and serious durability problem of concrete structures

Dr. Muneer AL-ATRASH\*

(Accepted 3/12/1996)

### □ ABSTRACT □

*The aim of this paper is to analyze the primary causes which lead to corrosion of steel reinforcement then the concentration on concrete cracks during an experimental research, that was tested for specimens of reinforcement concrete beams using different concrete qualities.*

*The results indicated that cracks increased the penetration of aggressive agents and resulted in an early corrosion initiation. But corrosion spread depended significantly on concrete quality, high quality concrete ( $w/c < 0.50$ ) showed a great ability to limit the corrosion damage to harmless surface corrosion at the crack zone.*

*There wasn't any clear influence of crack width either on corrosion damage or on penetration of aggressive agents.*

---

\* Lecturer at Department of Instructural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Lattakia, Syria.

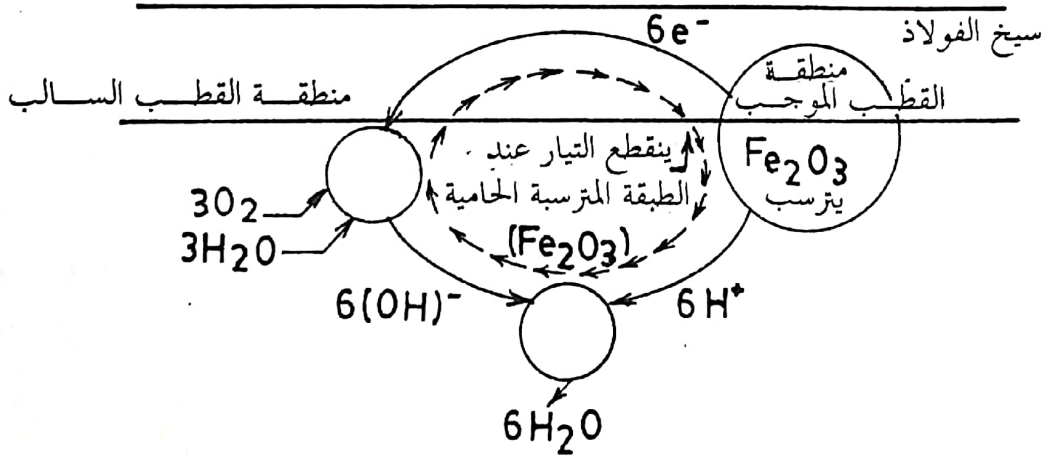
## 1- المقدمة:

ليسمح بتكون صدأ جديد، وبالتالي يتآكل فولاذ التسليح نتيجة الصدأ، فتضعف مقاومته ومعه تضعف مقاومة العنصر البيتوني المسلح.

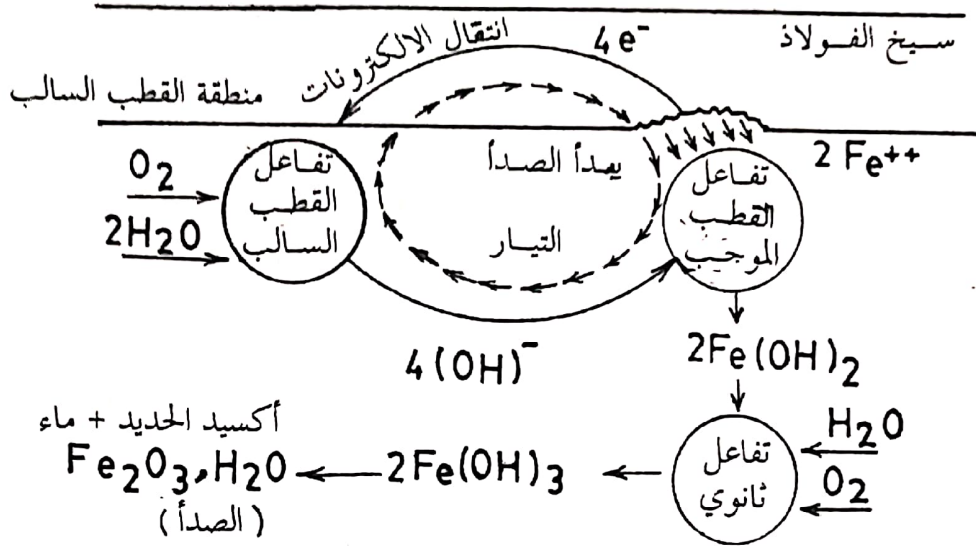
وإن هيدروكسيد الحديد الناتج  $Fe(OH)_2$  يزداد حجمه ازدياداً كبيراً في الحجم الأصلي لقضيب الفولاذ فيؤدي إلى تولد إجهادات انفصالية دائرية عالية حول قضبان التسليح تؤدي بدورها إلى شقوق محلية يمكن أن تمتد باتجاه طول القضيب مشكلة شقوقاً طويلة موازية له، وعند زيادة الصدأ، تبدأ طبقة البيتون السطحية بالتساقط.

صدأ فولاذ التسليح عبارة عن عملية كهروكيميائية، تحدث عند السطح الفاصل بين فولاذ التسليح والبيتون بوجود الرطوبة والأكسجين؛ وتحتاج لتيار من الإلكترونات، يسري من قطب موجب إلى قطب سالب، ويجب توفر الوسط الذي ينقل التيار الكهربائي بين القطبين، وهو عادة ماء أو محلول مائي فيه أملاح ذائبة، ويتم التفاعلات الكيميائية [2]، الشكل رقم (1).

ويعتبر أكسيد الحديد الناتج ( $Fe_2O_3$ ) شديد الامتصاص للماء وضعيف الالتصاق بالحديد، وبذلك تسهل إزالته بالذوبان البطيء، تاركاً سطح الحديد



(a): سلامة الطبقة الحامية تمنع حدوث الصدأ.



(b): حدث التكسر في الطبقة الحامية لفولاذ التسليح فبدأ الصدأ

الشكل (1): التفاعل الكيميائي في حالة وجود حماية ضد الصدأ وفي حالة الصدأ [2].

وبالتالي استقصاء أهم الإجراءات اللازمة للحد من التآكل.

2- دور البيتون في تأمين حماية فولاذ التسليح من الصدأ:

يعمل البيتون على حماية فولاذ التسليح من الصدأ، من خلال تفاعلات كيميائية على سطح الفولاذ، تؤدي إلى تكون طبقة حامية سلبية على سطح قضبان التسليح، وكذلك من خلال حاجز يمنع وصول الرطوبة والأملاح من الجو المحيط إلى فولاذ التسليح، وهذا الحاجز هو الغطاء البيتوني الذي يشكل قاعدية تحمي الفولاذ وتنتج عن التفاعلات التي تحدث أثناء شك البيتون وتصلده. وهذه القاعدية تمثل هيدروكسيد الصوديوم والبوتاسيوم

تعد الرطوبة والأكسجين وقود عملية الصدأ، بيد أن الصدأ لا يبدأ إلا إذا فقدت الحماية التي يوفرها البيتون لقضبان التسليح، نتيجة أسباب عدة أهمها: زيادة نسبة الكلوريدات بالخلطة أو التحول الكربوني للبيتون الخارجي أو حدوث تشققات نتيجة أسباب أخرى مما يسهل وصول الرطوبة إلى فولاذ التسليح ويبدأ الصدأ.

يهدف هذا البحث إلى تحليل أهم الأسباب المؤدية إلى صدأ فولاذ التسليح وتآكله في المنشآت البيتونية المسلحة، من ثم التركيز على تأثير تشققات البيتون -كونها المسبب الأساسي لمشاكل التآكل- وذلك من خلال بحث مخبري تجريبي



شكل رقم (2)، فتصبح الطبقة الحامية السلبية غير متزنة وتتكسر مما يجعل التيار الكهربائي يسري في الفولاذ ومن ثم يبدأ الصدأ.

ويحدث فقدان القاعدية نتيجة لعامل أو أكثر من العوامل التالية:

أبخرة ومحاليل حامضية يتعرض لها العنصر البيتوني المسلح.

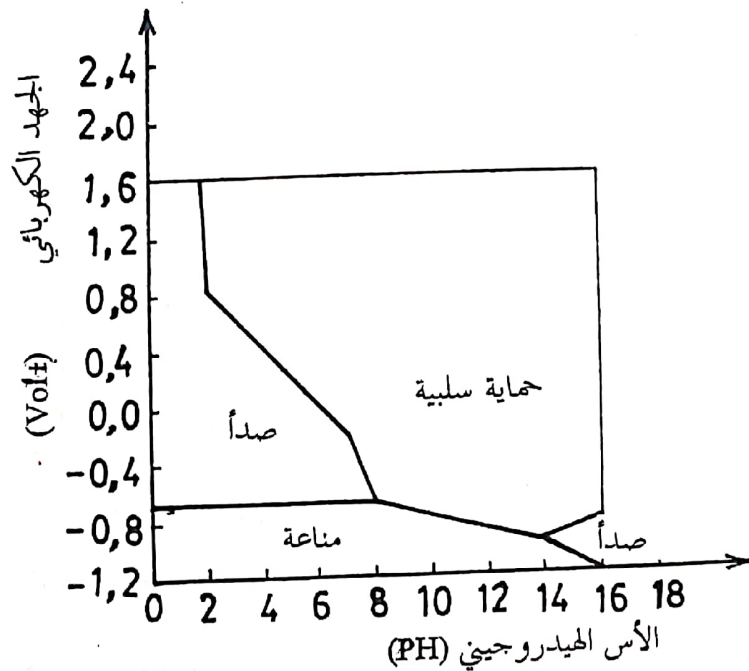
التحول الكربوني للغطاء البيتوني.

تغلغل الكلوريدات في البيتون سواء من المياه المحيطة أم من وجودها في الخلطة البيتونية أصلاً.

وجود شقوق سطحية بعمق يصل إلى قضبان التسليح، وخاصة إذا كانت الشقوق موازية لفولاذ التسليح.

والكالسيوم وهي ذات أس هيدروجيني (pH) يتراوح بين 12.5 إلى 13.5 [6]، وعند هذه القيمة تؤدي التفاعلات الكيميائية التي تحدث على سطح فولاذ التسليح إلى ظروف سلبية تمنع التفاعلات الكهروكيميائية التي تسبب الصدأ، كما تؤدي هذه التفاعلات إلى تكوين طبقة رقيقة جداً من نواتج الصدأ مثل أكسيد الحديد  $Fe_2O_3$  فتلتصق بسطح قضيب التسليح وتمنع حدوث الصدأ.

تبقى قاعدية الحماية فعالة لفترة طويلة من الزمن، إلا إذا أثرت عليها أملاح أو أحماض، أو إذا حدث تحول كربوني للبيتون السطحي فتفقد. إذا قلت قاعدية البيتون المحيطة بالفولاذ إلى حد ينخفض فيه الأس الهيدروجيني عن 10/،



شكل (2): علاقة الصدأ بالأس الهيدروجيني [2].

## 2-1: تأثير الأبخرة والمحاليل الحامضية:

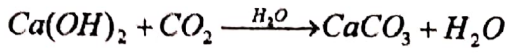
يفقد البيتون قاعدته نتيجة تغلغل الأبخرة الحامضية الموجودة في الهواء - غالباً ثاني أكسيد الكربون وفي المناطق الصناعية ثاني أكسيد الكبريت - إلى داخل البيتون، ويعتمد هذا التغلغل على سماكة الغطاء البيتوني ونفاذية البيتون، فالبيتون الرديء يكون نفوذاً، وبالتالي فإن مقاومته للأبخرة الحامضية ضعيفة [1].

## 2-2: تأثير التحول الكربوني لبيتون

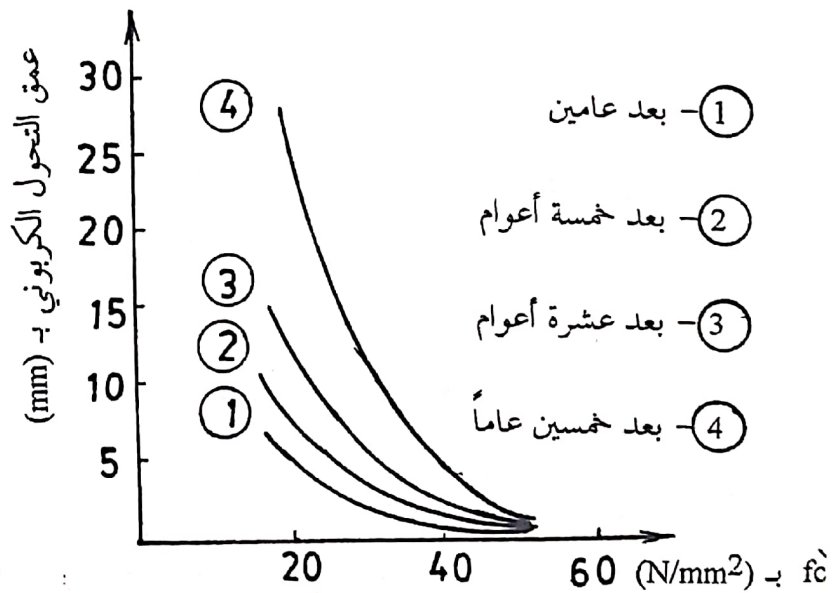
التغطية:

يفقد بيتون التغطية قاعدته نتيجة عملية التحول الكربوني للبيتون، وهي تفاعل ثاني أكسيد الكربون الموجود في

الجو مع المواد القاعدية الموجود في البيتون [4] - هيدروكسيد الكالسيوم ويحولها إلى كربونات:



ويعتمد معدل التحول على نفاذية البيتون، والرطوبة، ووجود تشققات سطحية [9]. إن لجودة البيتون تأثيراً كبيراً جداً على عمق التحول الكربوني، شكل رقم (3)، فالبيتون الجيد غير النفوذ لا يحدث له تحول كربوني إلا في حدود طبقة سطحية جداً (عدة ميليمترات) حتى بعد زمن طويل، بينما البيتون الرديء المنفذ يحدث له تحول كربوني بعمق يصل حتى عشرة أضعاف عمق التحول في البيتون الجيد.



شكل (3): عمق التحول الكربوني مع الزمن وتبعاً لجودة البيتون.

وينقسم التحول الكربوني إلى مرحلتين أساسيتين:

#### المرحلة الأولى:

وتبدأ من تاريخ صب البيتون حتى وصول التحول الكربوني إلى فولاذ التسليح، حيث تفقد الحماية السلبية التي توفرها له قاعدية البيتون فيبدأ الصدأ، وتستغرق هذه المرحلة وقتاً طويلاً إذا كان البيتون جيداً.

#### المرحلة الثانية:

يتطور الصدأ بمعدل يختلف من حالة لأخرى [3]، جدول رقم (1).

وتحدث عملية مشابهة للتحول الكربوني بوجود ثاني أكسيد الكبريت في الجو المحيط بالعناصر البيتونية المسلحة، وتسمى عملية التحول الكبريتي، وتسبب أيضاً نقص قاعدية البيتون المحيط بفولاذ التسليح، وإذا حدث تحول كربوني وكبريتي معاً، فإن ذلك سيزيد من سرعة فقدان البيتون لقاعديته. ولهذا ينصح بزيادة سماكة الغطاء البيتوني لفولاذ التسليح في الأجواء الملوثة بالكبريتات. ويجب ألا تقل سماكة التغطية بأية حال عن القيم المبينة في الجدول رقم (2) [2].

جدول (1): قابلية تآكل فولاذ التسليح المعرض للوسط المحيط [3]

0.003-0.005 mm/year	منطقة جافة وباردة - هواء نظيف غير ملوث (البادية)
0.005-0.01 mm/year	منطقة أقل جفافاً من الأولى - هواء مقبول غير ملوث
0.01-0.02 mm/year	مناخ ساحلي كمدينتي طرطوس واللاذقية
0.02-0.05 mm/year	المدن الصناعية الكبرى (دمشق-حلب) هواء ملوث
0.05-0.09 mm/year	المدن الصناعية المعرضة لأبخرة كيميائية، مصافي بترول حمص وبانياس

جدول (2): الحد الأدنى لسماكة التغطية البيتونية [2]

سماكة التغطية البيتونية (mm)				نوع التعرض
بحيث لا تقل عن قطر أكبر قضيب تسليح مستعمل				
المقاومة المميزة للبيتون على الضغط ( $N/mm^2$ )				
الجدران والبلاطات المصمتة		جميع العناصر عدا البلاطات		
> 25	≥ 25	> 25	≤ 2.5	محمي من الوسط الخارجي
10	15	15	20	
15	20	20	25	غير محمي (جو عادي)
20	25	25	30	عوامل ضارة



### 3-2: تأثير الكلوريدات:

يعتبر تأثير الكلوريدات على فولاذ التسليح أخطر من تأثير التحول الكربوني، فبينما يمكن منع حدوث مزيد من التدهور في عناصر الطبقة البيتونية السطحية التي تحولت كربونياً فإنه لا توجد وسيلة فعالة لمنع التدهور في حالة وجود تركيز خالٍ من الكلوريدات داخل الخلطة البيتونية إلا إزالة البيتون المتعطل تماماً حول فولاذ التسليح.

تدمر أيونات الكلوريدات الحماية السلبية لفولاذ التسليح داخل البيتون، والكلوريدات إما أن تكون موجودة في البيتون (مصادرها الحصى أو ماء الخلط أو الإضافات المحتوية على كلوريد الكالسيوم) وإما تصل إلى البيتون بعد استخدام المنشأ (ومصادرها مياه البحر أو المياه الجوفية أو أملاح إذابة الجليد). يؤدي وجود الكلوريدات في البيتون إلى تنشيط عملية الصدأ حتى ولو كانت قاعدية البيتون

ما تزال مرتفعة [11]. والكلوريدات المتغلغلة في البيتون من الخارج أشد تأثيراً على فولاذ التسليح من تلك الموجودة داخل الخلطة البيتونية، بسبب تجمع بعض الكلوريدات داخل الخلطة نتيجة إماهة البيتون، أما باقي الأيونات فستبقى ذائبة في الماء الموجود بالفراغات وحرارة الحركة فتؤثر على فولاذ التسليح.

وعندما يترافق تأثير الكلوريدات مع التحول الكربوني يصبح معدل الصدأ أسرع.

تبين الكودات العالمية أنه بالفترة الأخيرة تم تخفيض القيم المسموح بها والخاصة بتركيز الكلوريدات في البيتون وذلك في ضوء التجارب والخبرة المتاحة. وسطياً تم تحديد المحتوى الأقصى لأيونات الكلوريدات الذائبة في الماء في البيتون كنسبة مئوية من وزن الاسمنت [5] كالتالي:

0.4%	للاسمنت العادي أو سريع التصلد
0.2%	اسمنت مقاوم للكبريتات
0.15%	جو رطب معرض للكلوريدات
0.08%	بيتون مسبق الإجهاد

بداية التآكل وبالتالي يؤثر ذلك على العمر الاستثماري للمنشآت البيتونية المسلحة. لا تسبب الشقوق العمودية، عادةً، على اتجاه قضبان التسليح في استمرار عملية الصدأ إذا كان البيتون كثيفاً وضعيفاً

### 4-2: تأثير وجود الشقوق بالبيتون:

عملياً تظهر التشققات في المنشآت البيتونية المسلحة، وهذا يسهل عملية تغلغل العناصر الضارة بصورة أسهل مما هي عليه في البيتون غير المشقق، وهذا يسرع



والرطوبة يكون أكثر وخاصة في الساحل- ولذا يكون معدل الصداً أكبر [10].

إذن من المفيد أن نقترح أن الشقوق هي المسبب الأساس لمشاكل التآكل وذلك ارتباطاً مع الوسط المحيط المؤثر وسعة الشقوق ونوعية البيتون.

### 3- الاختبارات العملية:

3-1: الخلطات البيتونية، تحضير العينات، المحيط المؤثر:

تم تصميم ثلاث خلطات لتعطي ثلاثة أنواع للبيتون، بيتون رديء وبيتون وسط وبيتون عالي الجودة، وذلك باستخدام الاسمنت البورتلاندي العادي ورمل طبيعي -درجة وسط- وبحص طبيعي بتدرج بين 10-20mm بالنسب المبينة في الجدول رقم (3) [7،8].

المسامية وسبب ذلك أن الجزء المكشوف من القضيب الفولاذي عند الشق يتصرف كما لو كان قطباً موجياً، ولكن يلزم توفر الأوكسجين والرطوبة لأجزاء أخرى من القضيب نفسه أو قضبان أخرى متصلة به اتصالاً مباشراً أو كهربائياً -عن طريق الأساور- لكي يحدث الصداً أو يستمر، فإذا كان البيتون كثيفاً وضعيف المسامية وسماكة طبقة التغطية كبيرة لحد كافٍ لوقف الأوكسجين والرطوبة عندئذٍ ستنباطاً عملية الصداً وقد تتوقف كلياً، وكلما ازداد اتساع الشق ازداد معدل الصداً لأن مساحة أكبر من قضيب التسليح تفقد طبقتها الحامية السلبية، أما الشقوق الطولية الموازية لقضبان التسليح فتؤدي إلى استمرار عملية الصداً، لأن الطبقة الحامية السلبية تفقد عند أماكن كثيرة من القضيب، فإذا كانت القضبان قريبة من السطح الخارجي للمبنى فإن توفر الأوكسجين

جدول (3): مكونات الخلطات البيتونية [7،8]

النسبة W/C %	المواد مقدرة بـ (Kg/m <sup>3</sup> )				رقم الخلطة
	اسمنت	ماء	بحص	رمل	
71	253	177	1170	755	1
50	353	177	1160	685	2
39	453	177	1150	610	3

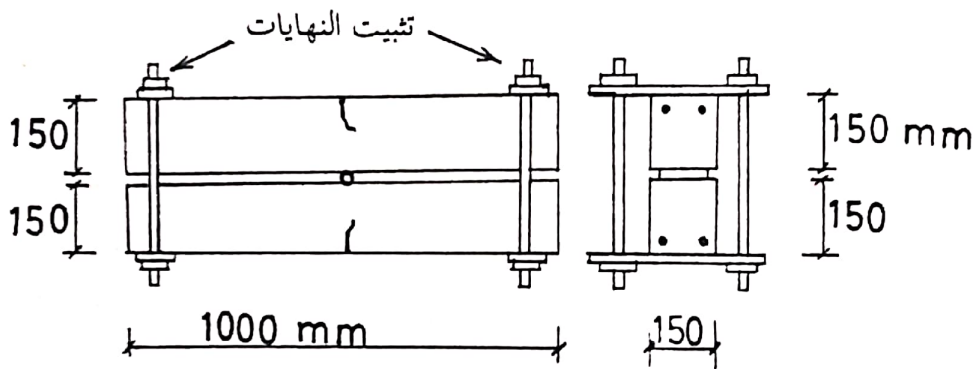
مساحة بقضبان ذات نتوءات 10mm φ، وكانت هذه القضبان في ظروف متماثلة [12]، ووضع تسليح عرضي

أما العينات فكانت عبارة عن جوائز بيتونية بمجاز 1000mm وذات مقطع عرضي مربع 150×150mm،

لتعرض العينات إلى كلوريد متسارع أو جو من الكربون المتسارع، فالعينات بجو من الكلوريد المتسارع تعرضت يومياً لرش بمحلول كلوريد الصوديوم خمس مرات لمدة ساعة بشكل مركز، والعينات بجو من الكربون المتسارع وضعت في حجرة تحتوي على غاز ثاني أكسيد الكربون  $CO_2$  بنسبة وافرة بالهواء (4%)، وذلك في درجة حرارة  $20^{\circ}C$  ورطوبة نسبية 55%.

لمقاومة الإجهادات المماسية الناتجة عن القص.

بعد 28 يوماً من الصب وبتبلييل نظامي بالماء تم أخذ جائزين من الخلطة نفسها وثبتت نهايتهما مع بعضهما بعضاً وفي الوسط وضع مسند بينهما فأجهدا، شكل رقم (4)، وتم تحديد سعة الشق من خلال تغير الإجهاد وبوساطة مقياس بصري كهربائي حتى العرض المطلوب للشق (0.10mm; 0.30mm)، تم



شكل (4): إحداث الشقوق في العينات (الجوائز) من خلال تطبيق جهود عليها [12]

في حالة التعرض للكلوريد تم أخذ عينات على عمق 27.5mm من منقطة الشق، ومن البيتون السليم لتعيين محتوى الكلوريد الكلي بانعكاس أشعة X. ولأجل قياس عمق الكربنة في حال عينات تتعرض للكربون استعملت قياسات مؤشر فينول [4].

### 2-3: إجراءات فحص العينات:

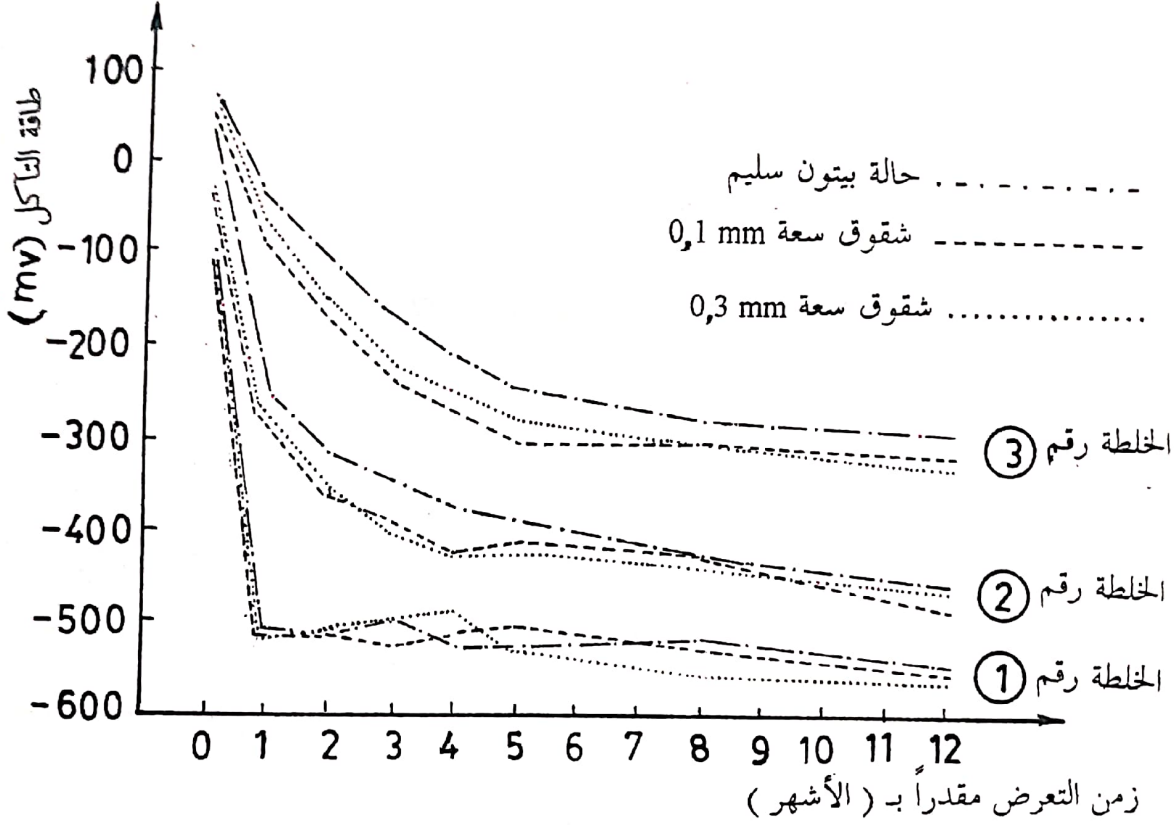
كانت قياسات طاقة التآكل تنقل باستعمال مقياس فولت عالي المقاومة مع نحاس/سلفات نحاس ( $Cu/CuSO_4$ ) كمرجع قطب كهربائي [6]. وفي نهاية عام كامل تم كسر العينات من أجل الكشف عن ظروف التسليح، فكان تقييم منطقة التآكل مأخوذاً كنسبة من المنطقة الكلية المتعرضة.

3-3: نتائج الفحص:

- بداية تأثير الكلوريد:

نتائج طاقة التآكل لمختلف العينات  
البيتونية المسلحة مأخوذة على أساس مدة

التعرض مبينة على الشكل رقم (5)، الذي  
يوضح أن هناك تناقصاً في طاقة  
التآكل [6]،



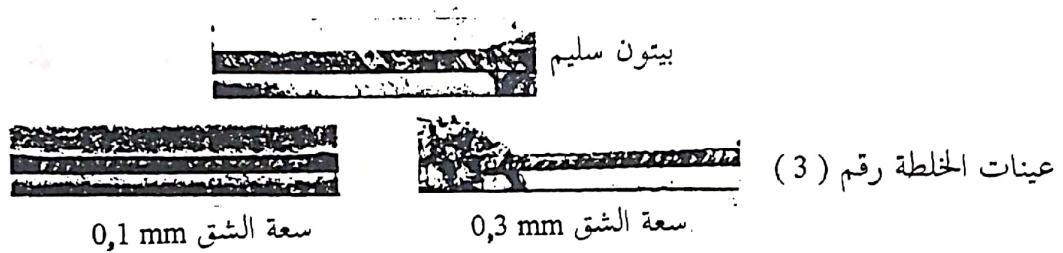
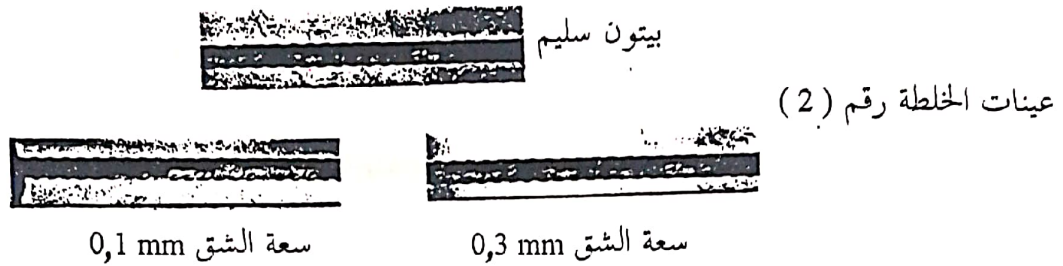
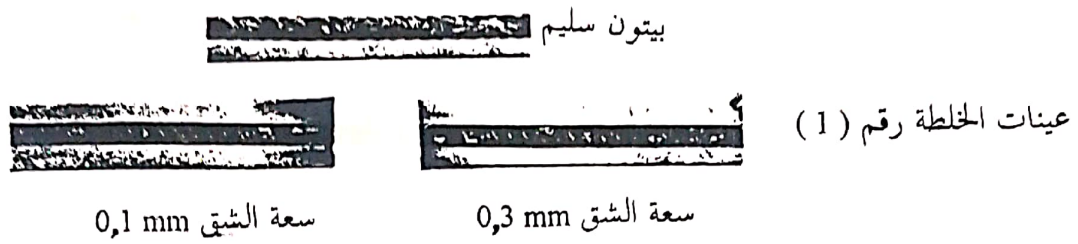
شكل (5): طاقة التآكل منسوبة إلى بداية تأثير الكلوريد

غير المتشقة. وكان متوسط طاقة التآكل  
في نهاية عام كامل للتعرض (-550;  
-300mv) 450 للعينات (1;2;3) على  
التوالي.

تبيين الصور في الشكل رقم (6)،  
ظروف قضبان فولاذ التسليح في حالة  
وجود أو عدم وجود تشققات، من مختلف  
الخلطات البيتونية.

مع تزايد زمن التعرض -ويختلف  
حسب الخلطات البيتونية- كانت كل  
العينات للخلطات رقم (1) ذات احتمال  
كبير لتآكل فعال أقل من (-350mv) في  
أقل من أسبوع من التعرض. احتاجت قيمة  
التآكل نفسها للعينات من الخلطة رقم (2)  
إلى زمن تراوح من شهرين بالنسبة  
للعينات المتشقة إلى ثلاثة شهور للعينات





شكل (6): ظروف فولاذ التسليح المتعرض لتأثير الكلوريد [12]

لكنه كان سطحياً فقط ويشبه إلى حد ما طبقة الصدأ الرقيقة جداً أو المتشكلة على قضبان التسليح ذي النتوءات في الهواء العادي، والجدير بالذكر أن التآكل حدث بشكل أساس في المقاطع المتشققة.

إن تأثير الشقوق وسعة الشق وجوده البيتون على محتوى الكلوريد والمناطق التي صدأت لمختلف عينات البيتون وذلك من أجل العينات المتشققة

لكن يعتمد شكل التآكل على نوعية البيتون، فمن أجل عينات للخلطات رقم (1)، ( $w/c=0.70$ ) ظهر التآكل على شكل حفر (تنقر) فوق منطقة التعرض بشكل مستقل عن عرض الشق، فبينما لم يلاحظ على عينات الخلطة رقم (2)، ( $w/c=0.50$ ) حفر إلا أن التآكل كان كثيفاً والمنطقة التي صدأت زادت عن 50% من المنطقة المعرضة. أما عينات الخلطة رقم (3)، ( $w/c=0.39$ ) فقد ظهر عليها الصدأ

والعينات غير المتشققة ميبين في الجدول رقم (4).

جدول (4): محتوى الكلوريد ومساحات التآكل تبعاً للعينات وسعة الشقوق [12]

رقم العينة	سعة الشق (mm)	مساحة التآكل %	محتوى الكلوريد كنسبة من وزن الاسمنت
(1)	0	100	11.3
	0.1	95	12.8
	0.3	85	13.2
(2)	0	55	5.9
	0.1	70	8.1
	0.3	60	7.8
(3)	0	< 10	0.6
	0.1	< 10	2.8
	0.3	10	2.1

سعة الشقوق (0.3mm;0.1mm)، وتبين أن كل قضبان فولاذ التسليح المعرضة كانت في حالة تآكل. بشكل عام تتآكل القضبان بشكل طولاني على طول جوانب المقطع العرضي المتشقق بكامل الطول للمنطقة الفعالة على طول القضيب بشكل أكثر أو أقل تناسباً مع عمق التحول الكربوني للعينة البيتونية، تزداد منطقة التآكل مع ازدياد فترة التعرض البدائي للتحول الكربوني، ويبدو واضحاً أن سعة الشقوق لا تلعب دوراً هاماً في طاقة التآكل، جدول رقم (5).

أشارت النتائج أن محتويات الكلوريد قد زادت في مناطق الشقوق مع زيادة النسبة (w/c). تم قياس ضرر التآكل كنسبة ما بين منقطة التآكل إلى المنطقة الكلية المعرضة، وكان هذا الضرر أكثر أو أقل تماثلاً للفولاذ المعرض من نوع البيتون نفسه وذلك بشكل مستقل عن ظروف الشق. وبالنتيجة يؤكد هذا أن أهم العوامل بالنسبة لحدوث التآكل بسبب الكلور هو النسبة (w/c).

- بداية التحول الكربوني:

تم اختبار عينات لفترة 8 أسابيع وعينات لفترة 16 أسبوع وذلك لقيمتين من

جدول (5): قياسات العينات المعرضة للتحويل الكربوني المتسارع [12]

سعة الشق (mm)	طاقة التآكل (mv)	مساحة التآكل %	عمق التحويل الكربوني (mm)	مدة التحويل الكربوني (أسبوع)
0.10	320-	8	8	8
0.30	330-	16	8	
0.10	370-	25	14	16
0.30	380-	25	14	

#### 4- التقييم والنتائج:

منخفض للأوكسجين كنتيجة للمسامات الصغيرة المليئة بالماء، تزداد المقاومة الكهربائية وهذا يقلل من خطر التآكل. لكن تحديد تزويد منطقة القطب السالب بالأوكسجين يحتمل أن يكون عامل تحكم، إلا إذا كان البيتون مشبعاً.

أهم العوامل المساعدة في انتشار التآكل هي المقاومة الكهربائية وانتشار أيونات الكلوريد.

من أجل نسب عالية لـ (w/c) وبسبب الانتشار الكبير للكلوريد سيكون الكلوريد بكميات كبيرة في مستوى الفولاذ بالوقت نفسه أو بعد التآكل بوقت قصير في جانب الشق. في النهاية يمكن أن يبدأ

من الواضح أن مقاومة تغلغل الكلوريد ضمن الشقوق مهمة بالمقارنة مع مقاومة الانتشار في طبقة التغطية من البيتون السليم. وهذا مؤكد من خلال زيادة محتوى الكلوريد في الشق المائل وبالتالي ينتج عن ذلك بداية مبكرة للتآكل في هذه المنطقة. تعتمد خطورة امتداد بقعة التآكل بعد ذلك بشكل أساس على جودة البيتون.

ويشير البحث إلى أن زيادة معدل الكلوريد في جانب الشق لا تؤدي بالضرورة إلى بداية التآكل في جانب الشق لأن ذلك يتعلق بجودة البيتون. فلأجل نسبة منخفضة لـ (w/c) ومع معدل انتشار



التآكل في مناطق كبيرة كما في حالة عينات الخلطة (1)، ولا يوجد اختلاف ملحوظ بين البيتون المتشقق والبيتون السليم.

في حالة نسبة منخفضة لـ (w/c) تكون قابلية تغلغل الكلوريد منخفضة، إذن سيكون التآكل حول جانب الشق محدوداً حيث إن محتوى الكلوريد هناك وافر. المقاومة الكهربائية العالية التي تقرر الاتصال بين القطب الموجب والقطب السالب سوف تحافظ على معدل تآكل قليل في هذه الجوانب ومع الزمن يمكن أن تتوقف أيضاً بسبب ميزة عدم قابلية النفوذية لنواتج التآكل التي يحتمل أن تلتصق على سطح الفولاذ.

وبالتالي يبدو أن البيتون ذا المقاومة العالية لانتشار الكلوريد يمكن أن يقلل من احتمال وجود الشقوق في البيتون، وأن الشقوق في حالة التحول الكربوني تؤثر كسطوح جديدة حيث إن التحول الكربوني يستمر على طول الاتجاه الجانبي على سطح الفولاذ، ويزيد ذلك بشكل منتظم مع زيادة مدة التعرض. العامل الحاسم لحدوث التحول الكربوني بهذه الحالة هو أيضاً نوعية البيتون التي تتحكم بتخلل أكسيد الكربون من المحيط الخارجي.

وأخيراً ينتهي البحث إلى النتائج التالية:

- بدأ تأثير الكلوريد على صدأ فولاذ التسليح عندما زاد تركيزه في الخلطة

البيتونية عن 0.3% من وزن الاسمنت وزاد تأثيره عندما كان مصدره خارجياً.

- زاد معدل محتوى الكلوريد بشكل ملحوظ في المقاطع المتشققة بالمقارنة مع البيتون السليم.

- لا يوجد دليل واضح للاقتراح أن لسعة الشق التأثير الأهم على محتوى الكلوريد، وعلى عمق التحول الكربوني أو على معدل التآكل للفولاذ المغطى بالبيتون.

- كان التحول الكربوني بطيئاً جداً في حالة البيتون عالي الجودة، بينما في حالة البيتون الرديء النفوذي وقلة سماكة الغطاء البيتوني ووجود الشقوق السطحية ووجود رطوبة نسبية عالية 50-70%، تسارع معدله.

- استمرار عملية الصدأ أدى إلى تشقق الغطاء البيتوني لأن حجم أكسيد الحديد الناتج من الصدأ أكبر بكثير من حجم الحديد الأصلي.

- مع ازدياد الصدأ ازدادت التشوهات في الطول والعرض ثم بدأ البيتون الخارجي بالتساقط.

- تعرضت عينات البيتون المتشقق لتحول كربوني متسارع، وتآكل فولاذ التسليح بعد فترة على طول جانبي الشق وبشكل متناسب مع عمق التحول الكربوني بصرف النظر عن سعة الشق.

- برهن البيتون ذو النسب القليلة لـ ( $w/c < 0.5$ ) قابلية الحد من ضرر التآكل حيث اقتصر على تآكل غير مؤذٍ في منطقة الشق، لذلك ننصح باستخدام بيتون عالي الجودة، خاصة

في العناصر الإنشائية والمنشآت المعرضة للعراء (العناصر الخارجية في البناء، الجسور، ...) أو المعرضة لمؤثرات ضارة مختلفة.

## REFERENCES

## المراجع

- [1]- برقاوي، شريف، 1987 - تصدع المنشآت الأسباب وطرق المعالجة والتدعيم، دمشق.
- [2]- أبو المجد، شريف /كمال، منير/ سلامة، عمرو/ الأبياري، شادية نجا، 1993- تصدع منشآت الخرسانية وطرق إصلاحها، القاهرة.
- [3]- جرجي، سمير، آب 1994- حماية المنشآت الفولاذية من الصدأ وتأثير التركيب الكيميائي على مكنومتها واستقرارها - مجلة باسل للعلوم الهندسية، العدد الأول، دمشق.
- [4]- Carbonation of concrete made with dense natural aggregates - building research establishment, 1981 - information paper 6/81, London.
- [5]- Commission 32 RCA- Resistance of concrete to chemical attack- Materiaux et constructions, 1981- Vol.14, No.8.
- [6]- ACI committee 222- corrosion of Metal in concrete, Report by committee 222- ACI, Detroit, Michigan, 1985-USA.
- [7]- REINSDORF, S., 1987 Betontaschenbuch, Band 1, Betontechnologie- Berlin.
- [8]- SCHULSE, W. / TISCHER, W. / ETTTEL, W. -P., 1987 - Der Baustoff Beton, Band 2- Berlin.
- [9]- American Standards for Testing and Materials, ASTM C876, Standards method for half- cell potentials of Book of Standards section 4, Vol.04.02. 1988.
- [10]- TREADAWAY, K.W.J. / COZ,R.N. / BROWN, B.L., 1989 - Durability of corrosion resisting steel in concrete proceedings of Institution of civil Engineers, part 1.
- [11]- HAQUE, M.N. / KAWAMURA ,M., 1992 - Carbonation and Chloride - induced corrosion of reinforcement in ply ash concrete - ACI Material Journal Vol.89, No.1.
- [12]- EL-GHALY, A.E.H. 1996 - Influence of concrete cracking on corrosion of steel reinforcement, in Cairo first international concrete on concrete structures, Cairo.