تأثير التآكل المعجل لحديد تسليح الشد على تصرف الانحناء للعتبات الخرسانية المسلحة [+]

قيس فاضل حسن [*]

المستخلص

تتضمن هذه الدراسة برنامجاً عملياً لصب وفحص اثنتا عشرة عتبة خرسانية مسلحة، وزعت على ثلاث نسب خلط وزنية، لمعرفة تأثير التآكل المعجل لحديد تسليح الشد السفلي باستخدام خلية تآكل كهربائية على تصرف الانحناء لهذه العتبات وسعتها القصوى وعلاقته مع اختلاف درجات التآكل ونسب خلط الخرسانة. حيث تم تقدير درجة التآكل (بسيطة، متوسطة، وشديدة) بالاعتماد على كمية الوزن النظري المفقود من مقطع حديد التسليح باستخدام قانون فراداي من خلال فترة بقاء النماذج داخل خلية التآكل. كان نمط التصدع نتيجة التآكل ثابتاً لجميع العتبات المتآكلة ولم يعط تصوراً عن مدى النقصان الحاصل في السعة القصوى واختلافه من عتبة إلى أخرى، حيث بدأت الشقوق في الاتجاه العمودي لحديد التسليح الطولي في منتصف فضاء العتبة تقريباً وبمعدل فقدان مقطع حديد التسليح مقداره ٣.١%. بالرغم من التآكل الشديد لحديد التسليح والتصدع الواضح لخرسانة الغطاء إلا أن عرض أكبر شق خرساني ناتج عن التآكل لم يتجاوز 1 mm. سببت عملية التآكل نقصاناً في سعة التحمل الأقصى وتشوه المنتصف للعتبات تناسب مع درجة التآكل، حيث كان أكبر نقصان لحمل الانحناء الأقصى مقداره ٣٦% للعتبة R2D، وأكبر نقصان للتشوه مقداره ٥٤% للعتبة R1D. كما أعطت قراءات انفعال الخرسانة مع عمق العتبة تأثيراً واضحاً للتآكل في زيادة هذه الانفعالات والتشققات وخاصة في منطقة الشد.

EFFECT OF ACCELERATED CORROSION OF TENSION REINFORCEMENT ON BENDING BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

Abstract:

This study comprises an experimental program to cast and test twelve reinforced concrete beams, of three different mix proportions, to know the effect of accelerated corrosion of bottom tension steel using electric corrosion cell on the bending behavior and ultimate capacity of the beams with variable corrosion degree and mix proportions. Corrosion degree (simple, moderate, and heavy) is assessed depending on theoretical weight loss of steel section using Faraday's Law through the period were the specimens leaved in corrosion cell. Crack pattern due to corrosion was the same for all beams and did not give an indication for the loss and variation in ultimate capacities, and these cracks developed in direction perpendicular to longitudinal reinforcement in approximately beam mid-span in a mean steel section loss by 3.1%. In spite of the high steel corrosion degree and the noticeable spalling of cover concrete, but the maximum crack width due to corrosion was less than 1 mm. Corrosion process caused decrease in

[+] تاريخ استلام البحث ٢٠١١/٥/٩ ، تاريخ قبول النشر ٢٠١٢/٧/٢ .

[*] مدرس/ الكلية التقنية / كركوك

ultimate capacities and mid-span deflections proportioned to corrosion degree, and the maximum loss in ultimate bending capacity was by 36% for beam R2D, and the maximum loss in mid-span deflection was by 54% for beam R1D. Concrete strain readings through beam depth also showed noticeable corrosion effect in increasing these strains and cracks, specially in tension zone.

المقدمة:

يعرف التآكل بأنه التفتت الناتج من تفاعل مادتين أو أكثر أو مكوناتهما في وجود وسط مساعد كالحرارة والرطوبة والأملاح. كما أنه إفساد للمادة أو خواصها نتيجة تفاعلها مع المؤثرات الخارجية أو الداخلية بحيث يفقد المنشأ مواصفاته التصميمية والغرض من استخدامه فالمنشآت الصناعية والأبنية السكنية والصحية والجسور والمطارات كلها تتأثر سلباً بالتآكل في حال إهمال علاجه وتحتاج إلى تكاليف باهظة لإعادة استثمارها وتشغيلها. ويحدث التآكل في المنشآت ببطء شديد وهدوء لكن الخسائر التي يسببها تفوق التصور، فمنها مادية واقتصادية ومنها صحية تتعلق بصحة الإنسان وتؤثر عليه مباشرة بالإضافة إلى تأثيرها في البيئة المحيطة به.

ومن العناصر الإنشائية المهمة التي يؤثر فيها التآكل مباشرة وبشكل سلبي وكبير هي العتبات الخرسانية المسلحة. فبالرغم من توصيات الكود الأمريكي للخرسانة [1] بتوفير غطاء خرساني لضمان عدم تغلغل أملاح الكلوريد وتآكل حديد التسليح إلا أن التشققات التي تحدث في الخرسانة في مراحل التحميل المختلفة وخاصة منطقة الشد تسبب إضعافاً للغطاء الخرساني في حماية حديد التسليح [2]. وفي كثير من الحالات نكون بحاجة إلى إعادة تأهيل عتبة أو جسر معين وذلك لوجود زيادة في الأحمال المتوقعة عليه فلهذا من أولى خطوات إعادة التأهيل هي معرفة درجة التآكل الحاصل في حديد التسليح وتأثيره ومحاولة تقليل الأضرار الإنشائية الناتجة عنه.

إن تآكل حديد التسليح هو عملية كهروكيميائية ينجم عنها سريان تيار كهربائي خلال وسط منحل كهربائياً ينتج عنه حدوث تفاعل أكسدة في أحد أطراف التفاعل مكوناً الأنود:

$$Fe \rightarrow Fe^{+2} + 2e \quad \ldots\ldots(1)$$

ولحدوث التوازن الإلكتروني، فأن الإلكترونات الناتجة عن التفاعل الأنودي تستهلك في الطرف الأخر من التفاعل مكوناً الكاثود:

$$O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4\,(OH)^- \quad \ldots\ldots(2)$$

وأيون الهيدروكسيد الناتج من التفاعل الكاثودي يتفاعل مع الحديد في منطقة الأنود لينتج الصدأ:

$$Fe^{+2} + 2OH^- \rightarrow Fe\,(OH)_2 \quad \ldots\ldots(3)$$

أن تآكل حديد التسليح يحدث نتيجة تكوين خلية كهربائية ذات أربع مقومات أساسية: الأنود والذي تحدث عنده الأكسدة والكاثود والذي يحدث عنده الاختزال ومسار معدني لسريان الإلكترونات والالكتروليت لسريان الأيونات [4,3]. إن البحوث التي تم نشرها في هذا المجال وإن كانت قليلة ولكنها ركزت بصورة أساسية على الخواص الميكانيكية لحديد التسليح خارج الخرسانة، بينما ركز البعض القليل منها على تصرف الأعضاء الخرسانية المسلحة التي تآكل فيها حديد التسليح ودراسة تصرفها وسعتها القصوى. فقد أجرى الباحثان [5] دراسة عملية لمعرفة مدى تأثير التآكل على مقاومة القص لعتبات خرسانية مسلحة، وقد تم تعريض حديد تسليح القص إلى عملية تآكل معجلة أجريت باستعمال خلية تآكل لعبور التيار الكهربائي خلال حديد القص. حيث تكونت خلية التآكل من شبكة سلك قياس ١٤ وبفتحة مقدارها mm ٦ في

الاتجاهين، اعتبرت كقطب سالب، وضعت على جوانب وأسفل العتبات. وقد عمل حديد تسليح القص كقطب موجب والذي ربط هو أيضاً بالتوازي إلى مصدر طاقة خارجي، وقد وضعت طبقة من القطن، بقيت مبللة باستمرار عن طريق ضخ الماء لها بين الشبكة وسطح الخرسانة لتزويد الاتصال الكهربائي بالإضافة إلى نشر الأوكسجين إلى الخرسانة. أشارت الاختبارات إلى نقصان التحمل الأقصى للقص للعتبات المتضررة بالإضافة إلى نقصان في مقدار التشوه العام في الفشل. كما أجرى الباحثون [6] دراسة عملية لمعرفة مستوى الاستقطاب الحاصل في حديد التسليح المطمور في خرسانة ذات مقاومة كهربائية مختلفة وعلاقته بالمساحة السطحية لكل من حديد التسليح وقطب الآنود والمسافة بينهما وتأثير ذلك بالجهد الخارجي المسلط وتضمن المنهاج العملي إعداد ١٢ نموذجاً مسلحاً تم تعريضها جزئياً لمحلول كلوريد الصوديوم بتركيز ٣.٥% وقد تم إجراء اختبارات كهربائية وكهروكيميائية تتمثل باستقطاب وحماية الحديد كاثودياً لمستويات مختلفة من الجهد الخارجي. وقد بينت النتائج بان التدرج الرطوبي للنماذج أدى إلى حصول اختلاف في جهد نصف الخلية على طول حديد التسليح نتج عنه استقطاب كاثودي عالي في المناطق المغمورة كما أظهرت النتائج بأنه من الضروري تقسيم المنطقة المراد حمايتها كاثودياً تبعاً للمقاومة الكهربائية وجهد نصف الخلية. وقد أجرى الباحثون [7] اختبارات كهربائية وكهروكيميائية تتمثل باستقطاب حديد التسليح كاثودياً ولمستويات مختلفة من الجهد الخارجي والجهد الفعلي وكمية التيار المار بالدائرة الكهربائية. أشارت نتائج البحث أن التدرج الرطوبي لنماذج خرسانية مسلحة أدى إلى حدوث جهد نصف خلية مختلف على طول حديد التسليح نتج منه استقطاب كاثودي عالي في المناطق المغمورة بمحلول الفحص مقارنة مع الاستقطاب في المناطق الجافة ويزداد هذا الاستقطاب بزيادة الجهد الخارجي المسلط. كما أشارت النتائج إلى تأثر مستوى الاستقطاب بكثافة حديد التسليح المعبر عنها بالمساحة السطحية، حيث يقل مستوى الاستقطاب بزيادة كثافة حديد التسليح بثبوت الجهد الخارجي، وزيادة مقدار الاستقطاب تتطلب زيادة المساحة السطحية للأنود التي تؤدي إلى زيادة التيار الكاثودي المسبب للاستقطاب.

أهداف البحث:

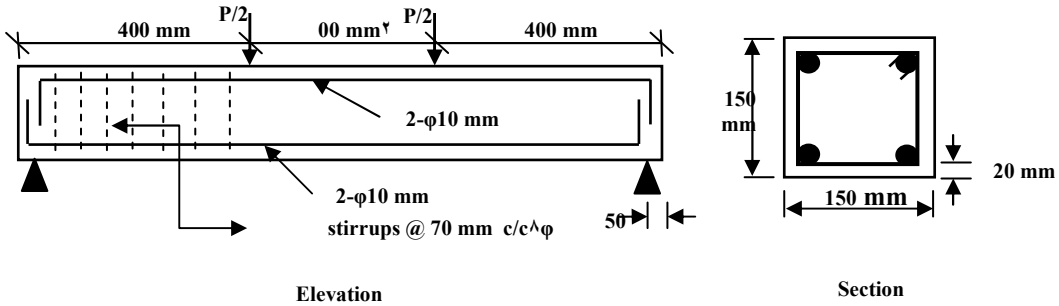
مما سبق نرى أن تأثير التآكل في حديد تسليح منطقة الشد للعتبات الخرسانية المسلحة على تصرفها في الانحناء لم يدرس بشكل كاف، ولم توضع طريقة واضحة وتصور دقيق لحد ألان لمعرفة تصرف العتبات المتآكلة ومعرفة النقصان الحاصل في سعتها القصوى ونسبة مطيليتها. لذا فان هذا البحث يهدف للمشاركة في إعطاء فكرة عن تصرف الانحناء للعتبات متآكلة حديد التسليح في منطقة الشد وسعتها القصوى ومقدار النقصان في نسبة مطيليتها وبدرجات تآكل معجل مختلفة اعتماداً على الوقت المخصص لها في خلية التآكل الكهربائية وكمية الوزن النظري المفقود لحديد التسليح المتآكل، ولنسب خلط مختلفة أيضاً، الأمر الذي قد يساعد على إعادة حسابات الأحمال التصميمية للعتبات المتآكلة وحتى إعادة تأهيلها اعتماداً على تقدير درجة التآكل ومدى الضرر الناتج من هذا التآكل.

البرنامج العملي:

أ- وصف النماذج

تضمن البرنامج العملي تحضير وصب اثنتا عشرة عتبة خرسانية مسلحة باستخدام قوالب فولاذية متماثلة، وقد كانت أبعاد مقطع العتبات (150 mm*150 mm) وبطول ١٠٠٠ mm، كما مبين في الشكل رقم (١). وقد تم تسليحها بشكل متماثل، حيث احتوت كل عتبة على قضيبي تسليح بقطر ١٠ mm لمنطقة الشد السفلى بالإضافة إلى قضيبي تسليح بقطر ١٠ mm لمنطقة الضغط العليا، وكانت المسافة بين المساند ٩٠٠ mm وفضاء العزم الأقصى ٢٠٠ mm.

كما احتوت كل عتبة خرسانية على حديد قص بقطر ٨ mm وموزعة على ٧٠ mm بين المراكز. قسمت العتبات الخرسانية على ثلاث مجموعات تختلف بنسبة خلط المواد: المجموعة الأولى تحتوي على أربعة عتبات خرسانية مسلحة بنسبة خلط وزنية (أسمنت:رمل:حصو) مقدارها (١:١.٢:١.٧)، على التوالي، كانت إحدى هذه العتبات الأربعة غير متآكلة حديد التسليح واعتبرت عتبة السيطرة لنسبة الخلط المذكورة وثلاث عتبات متآكلة حديد التسليح في منطقة الشد لثلاث درجات مختلفة من التآكل تم قياسها اعتماداً على فترة تعرض العتبة للتآكل المعجل لحديد التسليح أو بمعنى آخر نسبة النقصان الوزنية النظرية لمقطع حديد التسليح المتآكل. المجموعة الثانية التي احتوت أيضاً على أربع عتبات خرسانية مسلحة كانت نسبة الخلط الوزنية فيها (١:١.٥:٢.٢)، حيث كانت أحدى هذه العتبات غير متآكلة لحديد التسليح وقد اعتبرت عتبة السيطرة لنسبة الخلط الثانية والثلاث عتبات الأخرى كانت متآكلة حديد التسليح في منطقة الشد بنفس درجات التآكل الثلاث للخلطة الأولى. المجموعة الثالثة التي احتوت أيضاً على أربع عتبات خرسانية مسلحة كانت نسبة الخلط الوزنية فيها (١:٢:٣)، حيث كانت أحدى هذه العتبات غير متآكلة لحديد التسليح وقد اعتبرت عتبة السيطرة لنسبة الخلط الثالثة والثلاث عتبات الأخرى كانت متآكلة حديد التسليح في منطقة الشد بنفس درجات التآكل الثلاث للخلطتين الأولى والثانية، وكانت نسبة ماء/أسمنت لجميع الخلطات ثابتة مقدارها ٠.٤٥، وكما مبين في الجدول رقم (١).



شكل رقم (١) يبين أبعاد وتسليح العتبات المستخدمة في هذه الدراسة

جدول رقم (١) يبين درجات التآكل المعجل ونسب الخلط للعتبات التي تم فحصها في هذه الدراسة

نسبة الخلط (أسمنت:رمل:حصو)	درجة التآكل	فترة التعرض للتآكل (يوم)	تسمية العتبة
١:١.٢:١.٧	-	-	R1A*
	بسيطة	١٥	R1B
	متوسطة	٣٠	R1C
	شديدة	٦٠	R1D
١:١.٥:٢.٢	-	-	R2A*
	بسيطة	١٥	R2B
	متوسطة	٣٠	R2C
	شديدة	٦٠	R2D
١:٢:٣	-	-	R3A*
	بسيطة	١٥	R3B
	متوسطة	٣٠	R3C
	شديدة	٦٠	R3D

* عتبات السيطرة لنسب الخلط المذكورة

ولقياس شدة التآكل المعجل لحديد تسليح الشد اعتماداً على الوزن المفقود عند التآكل فقد تم اعتماد قانون فراداي لقياس النقصان الحاصل في وزن الحديد المتآكل عن طريق احتساب كمية الصدأ المتكونة اعتماداً على شدة التيار المار

خلال حديد التسليح المعرض للتآكل، وقد كان هذا النقصان في الوزن هو المقياس لشدة التآكل والذي قسم إلى ثلاثة مستويات (تآكل بدرجة بسيطة بعد مرور ١٥ يوماً بمعدل نسبة فقدان وزن نظرية مقدارها ٨ %، تآكل بدرجة متوسطة بعد مرور ٣٠ يوماً بمعدل نسبة فقدان وزن نظرية مقدارها ١٥ %، وتآكل بدرجة شديدة بعد مرور ٦٠ يوماً بمعدل نسبة فقدان وزن نظرية مقدارها ٢٦ %). كما تم صب تسعة مكعبات خرسانية قياسية بأبعاد (150 mm* 150 mm* 150 mm)، ثلاثة لكل خلطة، وذلك لقياس مقاومة الانضغاط التقريبية للخرسانة.

تم فتح جميع النماذج من قوالبها بعد يوم واحد ليتم وضعها مغمورة داخل الماء المخصص للمعالجة ولمدة ٢٨ يوماً، حيث أخرجت بعدها لتبدأ عملية التآكل المعجل للعتبات المقرر تآكل حديد التسليح الشد فيها ولفترات التآكل الثلاثة المذكورة سابقاً. تم تسمية العتبات والنماذج اعتماداً على نسب الخلط للخرسانة ودرجة التآكل، فمثلاً العتبة R1A تعني عتبة السيطرة (بدون تآكل) لنسبة الخلط الأولى، والعتبة R1B تمثل العتبة الخرسانية بنسبة الخلط الأولى والمتآكلة لحديد تسليح الشد بدرجة تآكل بسيطة، بينما العتبة R2C هي العتبة الخرسانية بنسبة الخلط الثانية المتآكلة بدرجة تآكل متوسطة، والعتبة R3D هي العتبة الخرسانية بنسبة الخلط الثالثة بدرجة تآكل شديدة، وكما مبين في الجدول رقم (١) سابقاً.

ب- خصائص المواد الأولية المستخدمة

أستخدم في هذا البحث الأسمنت البورتلاندي الاعتيادي نوع (I) والمصنع في معمل أسمنت كركوك/العراق. كما تم استخدام الرمل والحصى الطبيعي المستخرج من نهر الخاصة في مقالع قضاء داقوق في كركوك وقد كان القطر الأكبر للرمل (والذي تم تجفيفه قبل الخلط) لا يتجاوز mm (٤.٧٥) والقطر الأكبر للحصى لا يتجاوز mm (١٠) بموجب مواصفات الكود الأمريكي للخرسانة [1] وكان تدرج الرمل والحصى المستخدم في فحص المناخل يقع ضمن التدرج المسموح به في المواصفات العراقية رقم ١٩٨٤/٤٥ للمجموعة (٢) [8] . كما تم أيضا استخدام قضبان تسليح مشوهة بقطر 10 mm و 8 mm وذات منشأ أوكراني لتسليح الانحناء ولتسليح القص، على التوالي، حيث كانت القضبان نظيفة لدرجة عالية وخالية من الصدأ، والجدول رقم (٢) يبين الخواص الفيزيائية الرئيسة لحديد التسليح المستخدم.

جدول رقم (٢) يبين الخواص الفيزيائية الرئيسة لحديد التسليح المستخدم

الخواص	القطر (mm)	مساحة المقطع (mm^2)	إجهاد الخضوع (MPa)	الإجهاد الأقصى (MPa)	الاستطالة %
النتائج	١٠	**78.54**	٥١٠	٦٤٥	١٦.٢
	٨	٥٠.٢٧	٤٢٠	٥٨٠	١٤.٥

أستخدم في هذا البحث حامض الهيدروكلوريك المركز (HCl)، الذي تم إضافته للماء المستخدم لغمر النماذج بنسبة حجمية مقدارها ١٠%، وذلك لما له من تأثير في زيادة التوصيل الكهربائي لعملية التآكل المعجل. كما استخدمت طبقات رقيقة من النحاس المتوفر في الأسواق المحلية والتي كانت بأبعاد (50 mm* 10 mm) وبسمك mm ٠.٧ للتعجيل من عملية التآكل عن طريق ربطها بالقطب السالب لمجهز التيار الكهربائي المستمر والتي ستذكر تفاصيلها لاحقاً. تم استخدام قوالب زجاجية بأبعاد (1200 mm*200 mm*200 mm) وبسمك زجاج mm ٦، تم تصنيعها في الأسواق المحلية، لغرض غمر النماذج إلى مستوى معين مع طبقات النحاس في الماء المخفف بالحامض.

ج- التآكل المعجَل للخرسانة

تم ربط حديد التسليح في منطقة الشد للعتبات بأسلاك نحاسية تمتد خارج القوالب، وبعدها تم صب الخرسانة وفتح القوالب بعد مرور يوم واحد ومن ثم معالجتها لمدة ٢٨ يوماً عن طريق غمرها بالماء داخل الحوض المخصص للمعالجة. وبعد إكمال عملية المعالجة وضعت العتبات الخرسانية المطلوب تآكلها في الأحواض الزجاجية عن طريق إسنادها إلى قطع خشبية كي لا تلامس الزجاج السفلي. ثم تم غمر كل عتبة خرسانية مع طبقة نحاس، والتي وضعت أفقياً أسفل العتبة بدون أن تلامسها، في حامض الهيدروكلوريك المخفف إلى ارتفاع 50 mm من سطح العتبة السفلي.

لتوفير عملية تآكل معجل لحديد التسليح الطولي السفلي تم استخدام خلية تآكل عبارة عن دائرة كهربائية مغلقة لتمرير تيار كهربائي خلال حديد التسليح المطلوب تآكله لفضاء الاختبار. حيث تم ربط جميع قطع حديد التسليح المطلوب تآكله في العتبات الخرسانية (الأنود) بالتوازي إلى القطب الموجب لمجهز التيار المستمر (DC Power Supply) وتم ربط طبقات النحاس (الكاثود)، والمغمورة في الماء المخفف بالحامض، بالتوازي إلى القطب السالب للمجهز، والشكل رقم (٢) يبين مخطط توضيحي لخلية التآكل المعجل المستخدمة في هذه الدراسة. لغرض توفير كمية كافية من الأوكسجين اللازم لعملية التآكل تم استخدام مضخة ماء صغيرة لتدوير الماء بين فترة وأخرى. كما تم تغليف حديد تسليح القص في منطقة تماسه مع حديد التسليح السفلي وذلك لتركيز التآكل على حديد التسليح السفلي وعزله عن بقية حديد التسليح للقص ولمنطقة الضغط. تم تسليط كثافة تيار مستمر ثابتة مقدارها ($0.6\ mA/cm^2$) وذلك اعتماداً على الدراسات السابقة لتآكل نماذج حديد تسليح مغمور داخل اسطوانات خرسانية [5]، حيث أثبتت الدراسات أن تسليط هذه الكمية من التيار المستمر تولد تآكلاً معجلاً لحديد التسليح المطمور في الخرسانة مشابهاً إلى درجة كبيرة لما يحدث في الواقع [9,5].

تم التحديث اليومي لكمية التيار المار خلال حديد التسليح باستخدام قانون فراداي وذلك لتثبيت كثافة التيار الابتدائية حتى في حالة نقصان مساحة حديد التسليح بسبب التآكل. حيث نص قانون فراداي على أن كتلة الصدأ المتكونة لوحدة المساحة السطحية لحديد التسليح نتيجة لسريان تيار كهربائي لفترة محددة يمكن حسابه نظرياً عن طريق العلاقة :[10]

$$M_{th} = \frac{W.I.T}{F}$$

حيث يمثل؛ M_{th}: كتلة الصدأ النظرية لوحدة المساحة السطحية لحديد التسليح (g/cm^2).

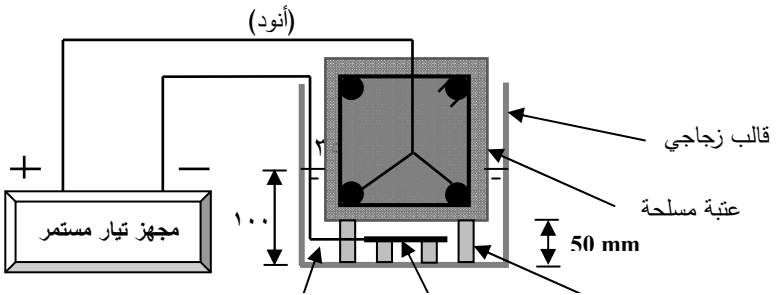
W: الوزن المكافئ لحديد التسليح والذي يمثل النسبة بين الوزن الذري لعنصر الحديد (Fe) إلى الوزن المكافئ له (٢٧.٩٢٥ g).

T: الوقت داخل خلية التآكل (sec).

I: كثافة التيار المسلط (Amp/cm^2).

F: ثابت فراداي (٩٦٤٨٧ Amp.sec).

تم تقسيم درجة التآكل اعتماداً على وقت بقاء النماذج داخل خلية التآكل، فبعد مرور ١٥ يوماً تم إخراج ثلاث عتبات خرسانية (باعتبار عتبة واحدة لكل نسبة خلط) حيث اعتبر هذا الوقت هو نهاية مرحلة التآكل البسيط، وبعد مرور ٣٠ يوماً تم إخراج ثلاث عتبات أخرى لتنتهي فترة التآكل المتوسط، وتم بعد ٦٠ يوماً إخراج الثلاث عتبات الباقية لتكتمل فترة التآكل الشديد.



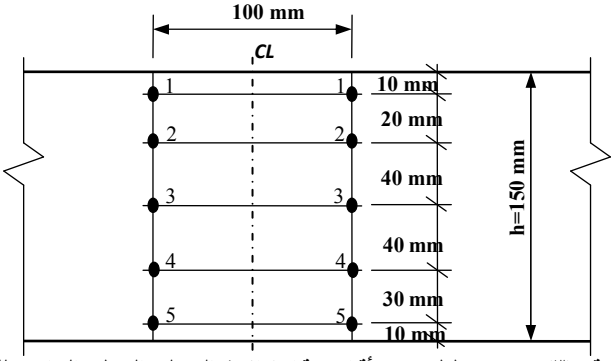
شكل رقم (٢) يبين مخطط الخلية الكهربائية المستخدمة للتآكل المعجل لحديد التسليح السفلي

د– الاختبارات الإنشائية

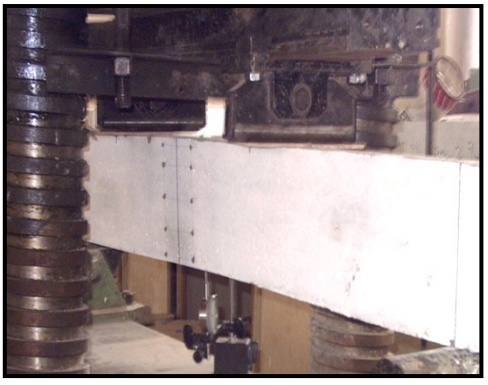
بعد انقضاء كل فترة من الفترات الثلاثة المخصصة لعملية التآكل داخل خلية التآكل المعجل، تم إخراج العتبات ومن ثم فحصها جميعاً، السيطرة والمتآكلة، لحد الفشل في حالة أربعة نقاط تحميل (مسندين في النهايتين مع نقطتين لوضع الأحمال) وكما مبين في الشكل رقم (١) سابقاً. كما تم قياس مقدار التشوه في وسط الفضاء مع التحميل لجميع العتبات عن طريق تثبيت قارئ ميكانيكي للتشوه، بمدى أقصى 30 mm، لمعرفة تصرف الانحناء للعتبات المتآكلة ومقارنتها مع عتبات السيطرة للخلطات الثلاثة.

تم قبل الاختبار صبغ جميع العتبات باللون الأبيض لسهولة تحديد التشققات، وتم أيضاً تحديد عشرة مواقع لأقراص قراءة الانفعال (Demec discs) لكل عتبة، عن طريق رسم تقاطعات أفقية مع خطين عموديين رسما في منتصف العتبة على الوجه الجانبي وكما مبين في الشكل رقم (٣) والشكل رقم (٤). وبعدها تم إلصاق أقراص قراءة الانفعال في مواقعها المخصصة وتم معايرة المسافة الأفقية بين كل قرصين لتصبح 100 mm وذلك عن طريق مسطرة المعايرة المرفقة مع الجهاز المستخدم لقياس الانفعال (Extensometer).

تم تهيئة العتبات ووضعها في جهاز فحص الانحناء وتم زيادة التحميل تدريجياً وقراءة التشوهات إلى حد الفشل، حيث استغرقت فترة فحص كل عتبة من ٣٠-٤٠ دقيقة تم فيها قراءة وتسجيل الانفعالات على عمق العتبة كل 5 kN من التحميل.



شكل رقم (٣) يبين مخطط توزيع أقراص قراءة الانفعال على السطح الجانبي للعتبة



شكل رقم (٤) يبين السطح الجانبي للعتبة مثبت عليه أقراص قراءة الانفعال

النتائج ومناقشتها:

تم مؤآكلة حديد التسليح السفلي بشكل معجل ولفترات مختلفة لجميع العتبات المطلوب التآكل فيها كما تم فحص المكعبات القياسية المخصصة لقياس قيم مقاومة الانضغاط للخلطات الثلاثة في هذه الدراسة وبعمر ٢٩ يوماً، كما مبين في الجدول رقم (٣). لجميع درجات التآكل الثلاثة لم يوجد أي اختلاف بصري واضح للتمييز بين العتبات من ناحية النقصان الحاصل في مقدار تحملها الأقصى، حيث تم تخمين مقدار الضرر الحاصل في حديد التسليح السفلي نتيجة التآكل المعجل عن طريق مراقبة كمية التيار المار في الحديد وتطبيق قانون فراداي. كما عانت جميع العتبات المعرضة للتآكل ظاهرياً تقريباً الأعراض نفسها المرافقة لعملية التآكل، ومنها التشققات وتصدع الغطاء الخرساني للمنطقة المغمورة في الحامض المخفف، ولطخات الصدأ المنتشرة على الخرسانة على طول العتبة في منطقة الحديد المتآكل. ولكن جميع هذه الظواهر، وان اختلفت قليلاً من عتبة إلى أخرى، لا تعني بالضرورة التنبؤ بالنقصان الممكن في مقدار التحمل الأقصى للعتبات. ومن المهم ملاحظة أن التآكل قد تركز على حديد التسليح الطولي السفلي المعزول عن حديد التسليح الطولي العلوي وحديد القص، حيث انه في الحالة الحقيقية يتآكل جميع حديد التسليح الطولي والقص الأمر الذي قد يعطي أعراضاً ظاهرية أقوى من حالة تآكل حديد التسليح السفلي فقط.

جدول رقم (٣) يبين نتائج فحص العتبات الخرسانية المسلحة

تسمية العتبة	معدل مقاومة انضغاط المكعبات (MPa)	حمل التشقق الابتدائي (kN)	حمل الخضوع (kN)	تشوه المنتصف لحمل الخضوع (mm)	الحمل الأقصى (kN)	تشوه المنتصف في الفشل (mm)	عمر الخرسانة (يوم)
R1A	37.8	٩	٧٥	٧.١	٩٠	٢٨.٥	٥٠
R1B		٨	٧٠	٧.٣	٨٤	٢٣.٠	٥٠
R1C		٨	٦٠	٧.٦	٧٦	١٨.٠	٦١
R1D		٧	-	-	٦٥	١٣.٠	٨٩
R2A	32.4	٨	٦٩	٩.٠	٧٥	٢٥.٣	٥٢
R2B		٧	٦٠	٩.٥	٦٥	٢١.٠	٥٢
R2C		٦	٥٥	١٠.٢	٥٧	١٥.٦	٦١
R2D		٦	-	-	٤٨	١٢.٠	٩٠
R3A	23.3	٧	٥٥	١١.٠	٥٧	١٧.٥	٥٣
R3B		٧	٤٩	١٢.١	٥٠	١٥.٥	٥٣
R3C		٦	-	-	٤٨	١٣.٨	٦٢
R3D		٥	-	-	٤٠	١٢.٠	٩٠

استناداً إلى المعاينة البصرية المنتظمة، تم توثيق التصدع الحاصل في الخرسانة بسبب تآكل حديد التسليح السفلي لكل عتبة. لوحظ أن نمط التصدع كان ثابتا لجميع العتبات المتآكلة، حيث حدثت الشقوق أولاً في المنطقة العمودية لموقع حديد التسليح السفلي المتآكل تقريباً في منتصف فضاء العتبة لتنتشر بالاتجاهين العلوي والسفلي للعتبة. كان معدل فقدان الوزن لمقطع حديد التسليح المتآكل الذي تبدأ فيه التشققات الأولية بالظهور لجميع العتبات هو بحدود ٣.١ % اعتماداً على قانون فراداي. وكان أكبر عرض شق خرساني مرئي نتيجة للتآكل قبل فحص العتبات لا يتجاوز مقداره 1

mm، بالرغم من الفقدان الكبير الحاصل في مساحة المقطع المحسوبة نظرياً للحديد والتصدع الواضح في خرسانة الغطاء لمنطقة حديد التسليح السفلي ولطخات الصدأ المرافقة لعملية التآكل. ويبين الجدول رقم (٤) قيم الأحمال والتشوهات المستخلصة من فحوصات العتبات الخرسانية حيث تمثل نسبة المطيلية حاصل قسمة مقدار التشوه في الفشل على مقدار التشوه في الخضوع (إن وجد). وتبين الأشكال من (٥) إلى (٩) علاقة الأحمال مع التشوهات في منتصف العتبة لجميع العتبات المفحوصة في هذه الدراسة. وتبين الأشكال من (١١) إلى (١٤) علاقات انفعال الخرسانة مع العمق لبعض العتبات المفحوصة وعند قيم أحمال مختارة.

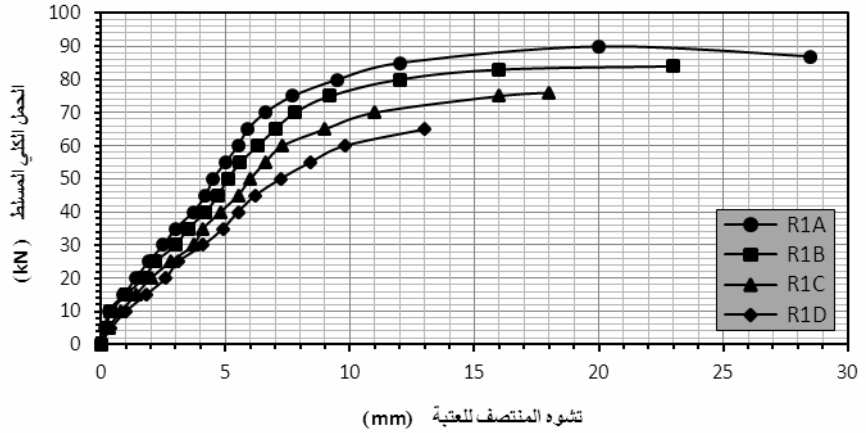
جدول رقم (٤) يبين التغير في قيم التحمل الأقصى والمطيلية وآلية الفشل للعتبات الخرسانية

تسمية العتبة	تشوه المنتصف في الفشل (mm)	النقصان في تشوه الفشل (%)	الحمل الأقصى (kN)	النقصان في الحمل الأقصى (%)	نسبة المطيلية (تشوه الفشل/تشوه الخضوع)	النقصان في نسبة المطيلية (%)	آلية الفشل
R1A	٢٨.٥	-	٩٠	-	٤.٠	-	T*
R1B	٢٣.٠	١٩	٨٤	٧	٣.٢	٢٠	T
R1C	١٨.٠	٣٧	٧٦	١٦	٢.٤	٤٠	T
R1D	١٣.٠	٥٤	٦٥	٢٨	-	-	T&C**
R2A	٢٥.٣	-	٧٥	-	٢.٨	-	T
R2B	٢١.٠	١٧	٦٥	١٣	٢.٢	٢١	T
R2C	١٥.٦	٣٨	٥٧	٢٤	١.٥	٤٦	T
R2D	١٢.٠	٥٣	٤٨	٣٦	-	-	C
R3A	١٧.٥	-	٥٧	-	١.٦	-	T
R3B	١٥.٥	١١	٥٠	١٢	١.٣	١٩	T
R3C	١٣.٨	٢١	٤٨	١٦	-	-	C
R3D	١٢.٠	٣١	٤٠	٣٠	-	-	C

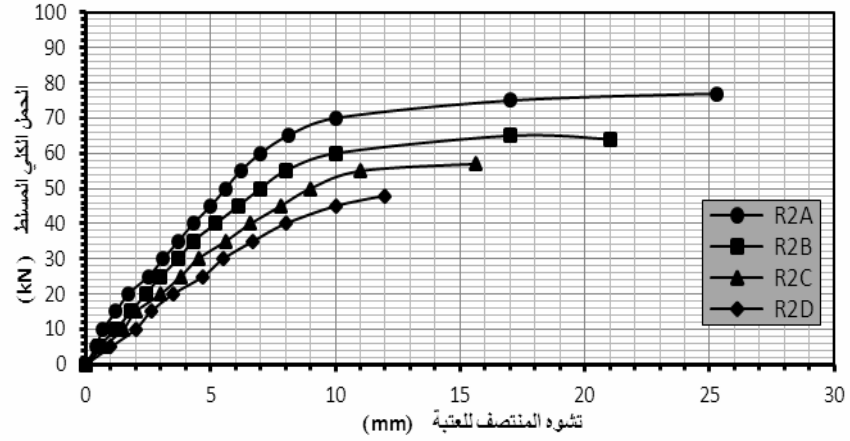
* T: خضوع حديد تسليح الشد السفلي
** C: تكسر خرسانة الضغط العلوية

عند مقارنة نتائج فحص العتبات المتآكلة مع عتبات السيطرة لكل خلطة، جدول رقم (٤)، يلاحظ وجود نقص في السعة القصوى وتشوه منتصف العتبة عند الفشل للعتبات المتآكلة حديد التسليح السفلي ويتناسب هذا النقص مع درجة التآكل. فلنسبة الخلط الأولى، لوحظ وجود نقصان في التحمل الأقصى مقداره ٧% للعتبة R1B ،التي عانت تآكلاً بدرجة بسيطة، عند مقارنتها مع عتبة السيطرة R1A، بينما كان النقصان في تشوه المنتصف للفشل مقداره ١٩%، شكل رقم (٥). بينما عانت العتبة R1C والمتآكلة لدرجة متوسطة نقصاناً مقداره ١٦% في التحمل الأقصى وفي تشوه المنتصف للفشل مقداره ٣٧% عند المقارنة مع عتبة السيطرة R1A. وعانت العتبة R1D والمتآكلة لدرجة شديدة نقصاناً في التحمل الأقصى مقداره ٢٨% وفي تشوه المنتصف للفشل مقداره ٥٤% نسبة لعتبة السيطرة نفسها، كما أن آلية الفشل كانت بخضوع حديد التسليح السفلي وتكسر خرسانة الضغط في نفس الوقت تقريباً مما يدل على الفقدان الكبير الحاصل في مساحة حديد التسليح السفلي نتيجةً للتآكل. ولنسبة الخلط الثانية، فقد كان النقصان واضحاً ومبكراً أكثر من النسبة السابقة وذلك للتغير الحاصل في جودة الخرسانة متمثلة بمقاومة انضغاط المكعبات المبينة في الجدول رقم (٣)، حيث كان النقصان في التحمل الأقصى للعتبة R2B، والمتآكلة لدرجة بسيطة، مقداره ١٣% عند المقارنة مع عتبة السيطرة R2A لنسبة الخلط الثانية، شكل رقم (٦)، بينما كان النقصان في تشوه المنتصف مقداره ١٧%. وقد كان النقصان في التحمل الأقصى للعتبة R2C، والمتآكلة لدرجة متوسطة، مقداره ٢٤% وفي تشوه المنتصف مقداره ٣٨% عند المقارنة مع عتبة السيطرة R2A. كما عانت العتبة R2D نقصانا في التحمل الأقصى مقداره ٣٦% وفي تشوه المنتصف مقداره ٥٣% عند المقارنة مع عتبة السيطرة R2A، ذلك لكونها قد تآكلت لدرجة شديدة والتي لوحظ من نتائج فحصها أنه لا توجد نقطة واضحة على منحني الحمل مع تشوه المنتصف تبين خضوع حديد التسليح. كما أن آلية الفشل لهذه العتبة، جدول رقم (٤)،

هي فشل الضغط للخرسانة مما يعني أن الربط بين حديد تسليح الشد والخرسانة المحيطة به، ومع التحميل المتزايد، قد فُقد مما أدى إلى عدم مشاركة حديد تسليح الشد في حمل الإجهادات وتكوين العزم المقاوم لعزم الحمل المسلط.

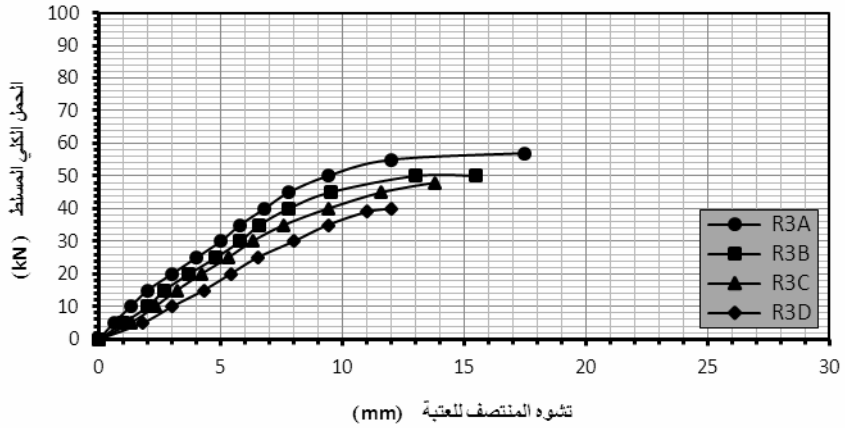


شكل رقم (٥) يوضح علاقة الحمل الكلي مع تشوه المنتصف للعتبات الخرسانية لنسبة الخلط الأولى



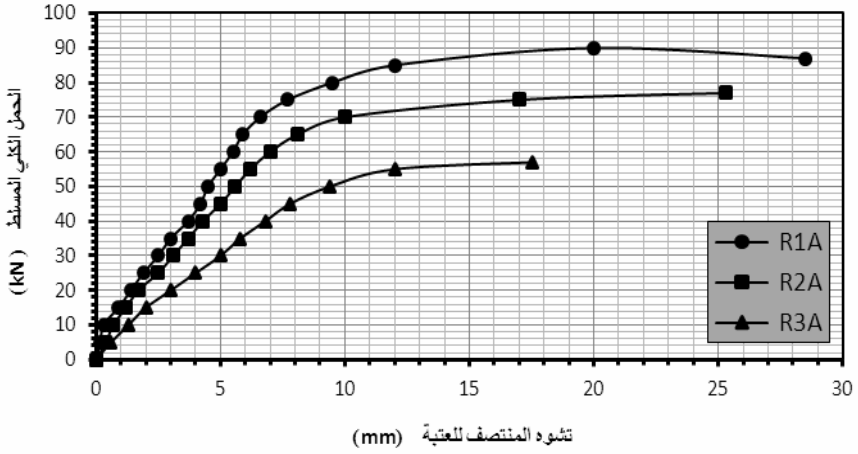
شكل رقم (٦) يوضح علاقة الحمل الكلي مع تشوه المنتصف للعتبات الخرسانية لنسبة الخلط الثانية

عند مقارنة نتائج فحص العتبة R3B، والمتآكلة لدرجة بسيطة، مع عتبة السيطرة R3A لنسبة الخلط الثالثة، جدول رقم (٤) وشكل رقم (٧)، لوحظ أن النقصان في التحمل الأقصى كان مقداره ١٢% بينما النقصان في تشوه المنتصف للفشل كان مقداره ١١%. أما العتبة R3C، والمتآكلة لدرجة متوسطة، فقد كان النقصان في التحمل الأقصى مقداره ١٦% وفي تشوه المنتصف مقداره ٢١% كما أن آلية الفشل كانت بتكسر خرسانة الضغط قبل الخضوع الواضح لحديد تسليح الشد. ومن الجدير بالذكر أن آلية الفشل نفسها حدثت عند فحص العتبة R3D، والمتآكلة لدرجة شديدة، وبنقصان في التحمل الأقصى مقداره ٣٠% وفي تشوه المنتصف مقداره ٣١% عند المقارنة بعتبة السيطرة R3A. كما أن منحيي الحمل مع تشوه المنتصف للعتبتين R3C و R3D لا يبينان خضوعاً واضحاً لحديد تسليح الشد السفلي. مما يدل على أن حديد التسليح قد فقد ارتباطه بالخرسانة ولم يعد يشارك في حمل الإجهادات مع الخرسانة وتكوين العزم المقاوم لعزم الأحمال الخارجية.

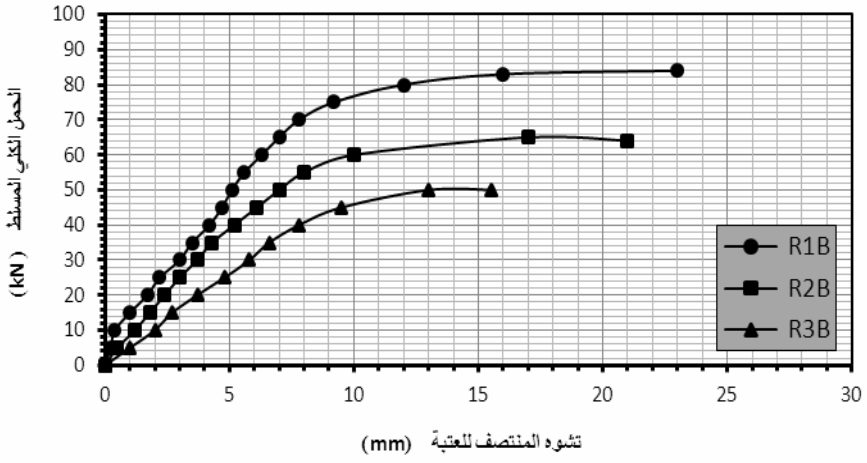


شكل رقم (٧) يوضح علاقة الحمل الكلي مع تشوه المنتصف للعتبات الخرسانية لنسبة الخلط الثالثة

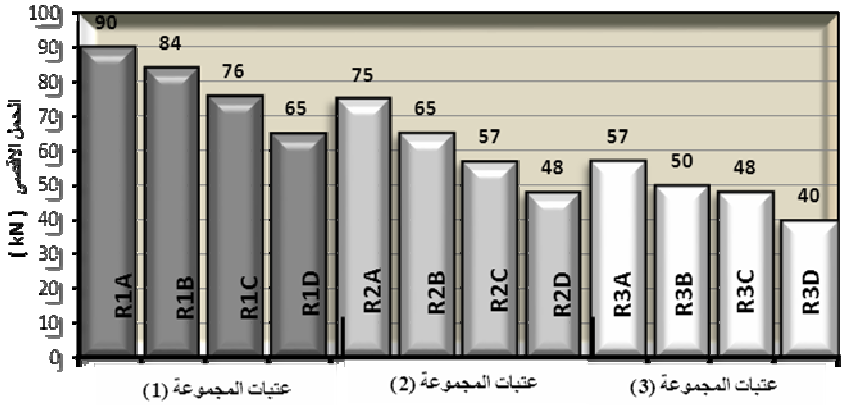
ويلاحظ أيضاً من الأشكال السابقة أن المنحنيات لكل نسبة خلط تكون متقاربة في مراحل التحميل الأولية، وعند الاستمرار في تسليط الأحمال وبعد ظهور تشققات الانحناء الأولية تبدأ منحنيات العتبات المتآكلة بالابتعاد عن منحني عتبة السيطرة ثم بعد ذلك تبدأ منحنيات العتبات المتآكلة بالابتعاد تدريجياً عن بعضها البعض إذ يأخذ التآكل دوره في زيادة حصول التشققات والانفعالات مع العمق وزيادة التشوه الناتج في العتبات الخرسانية والتقليل من جساءتها وبنسب متفاوتة تعتمد على درجة تآكل حديد تسليح منطقة الشد. والشكلين رقم (٨)، ورقم (٩) يوضحان مقارنة لمنحنيات تشوه المنتصف لعتبات لها نفس درجة التآكل، حيث يلاحظ تأثير نسبة الخلط على تصرف الانحناء للعتبات وتحملها الأقصى، فقد أعطت عتبات نسبة الخلط الأولى جساءة ومتانة أعلى من العتبات الأخرى، يليها في ذلك عتبات نسبة الخلط الثانية ثم الثالثة. ويبين الشكل رقم (١٠) قيم الحمل الأقصى لجميع العتبات المفحوصة في هذه الدراسة، كما تبين الأشكال من (١١) إلى (١٤) نماذج لعلاقة انفعال الخرسانة مع العمق لبعض العتبات ولقيم مختارة من الحمل الكلي المسلط، حيث يلاحظ تأثير التآكل على زيادة انفعالات الخرسانة وتشققاتها مع العمق، ومدى زيادة انفعالات الخرسانة في منطقة الشد وخاصة في مراحل قريبة من الحمل الأقصى، كما ويلاحظ أيضاً التغير الحاصل في موقع محور تعادل الإجهادات (neutral axis) وانتقاله باتجاه منطقة الضغط مع التحميل.



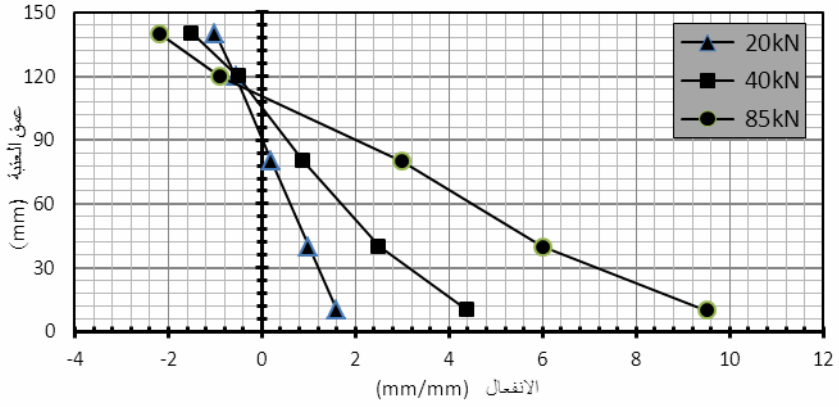
شكل رقم (٨) يوضح مقارنة لعلاقة الحمل الكلي مع تشوه المنتصف لعتبات السيطرة للخلطات الخرسانية الثلاثة



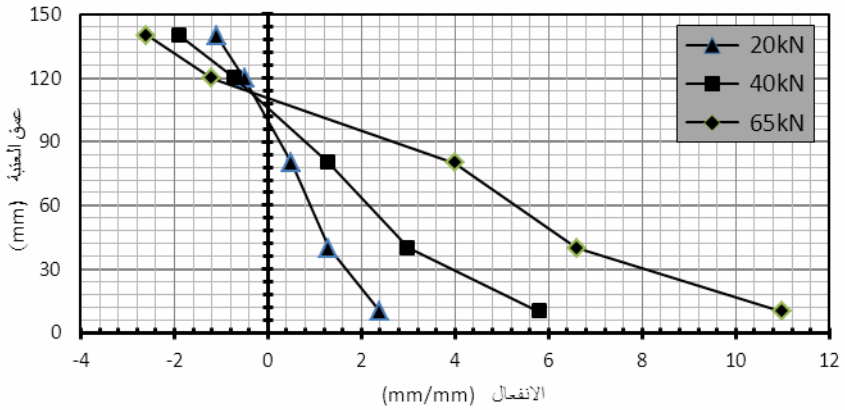
شكل رقم (٩) يوضح مقارنة لعلاقة الحمل الكلي مع تشوه المنتصف للعتبات المتآكلة لدرجة بسيطة للخلطات الثلاثة



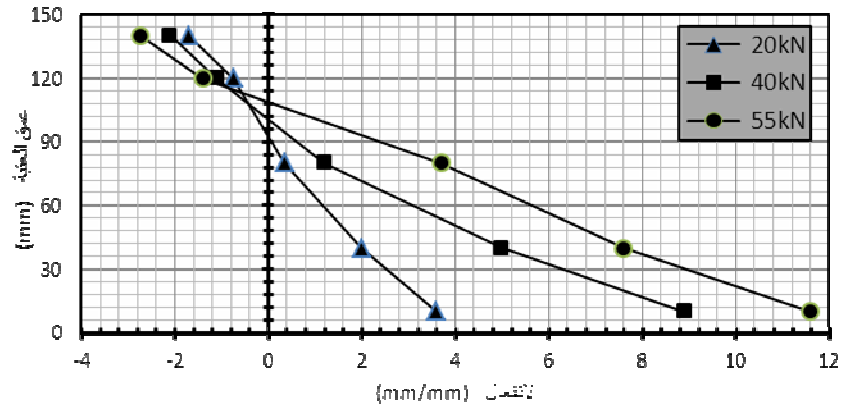
شكل رقم (١٠) يوضح قيم الحمل الأقصى لجميع العتبات الخرسانية المفحوصة في هذه الدراسة



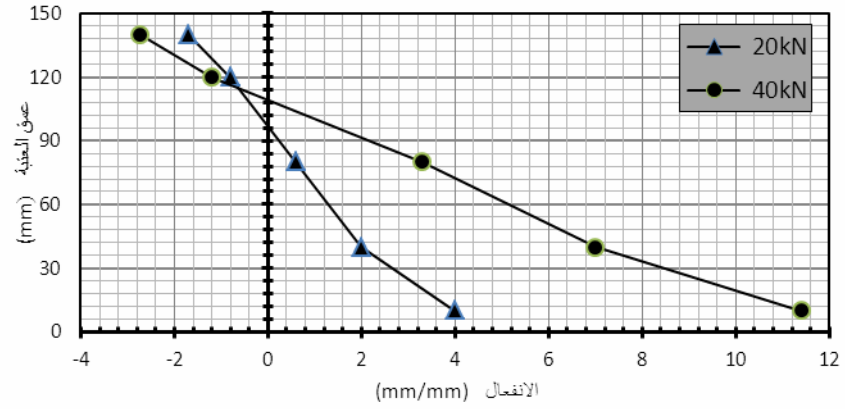
شكل رقم (١١) يوضح انفعال الخرسانة على عمق عتبة السيطرة R1A لثلاث مستويات من الحمل الكلي



شكل رقم (١٢) يوضح انفعال الخرسانة على عمق العتبة المتآكلة R1D لثلاث مستويات من الحمل الكلي



شكل رقم (١٣) يوضح انفعال الخرسانة على عمق عتبة السيطرة R3A لثلاث مستويات من الحمل الكلي



شكل رقم (١٤) يوضح انفعال الخرسانة على عمق العتبة المتآكلة R3D لمستويين من الحمل الكلي

لوحظ خلال الاختبارات وجود آليتين للفشل، الأولى تتمثل بخضوع حديد التسليح للشد متبوعا بفشل الخرسانة في منطقة الضغط، جدول رقم (٤) سابقاً، حيث يمثل هذا النوع من الفشل الحالة التصميمية السليمة وذلك لتوفيرها نسبة مطيلية كافية للعتبة، والثانية تتمثل بفشل الخرسانة في منطقة الضغط قبل خضوع حديد التسليح للشد والسبب في ذلك يعود

إلى النقص الكبير الحاصل في مساحة مقطع حديد التسليح السفلي المتآكل وبالتالي فقدان الربط بين الحديد والخرسانة المحيطة في منطقة التآكل الأمر الذي يؤثر وبشكل كبير على مشاركة حديد التسليح السفلي في حمل الإجهادات القادمة من الخرسانة المحيطة وبالتالي يؤثر على السعة القصوى لتحمل العتبات الخرسانية للأحمال الخارجية.

الاستنتاجات :

تم في هذه الدراسة إتباع برنامج عملي لصب وفحص اثنتا عشرة عتبة خرسانية مسلحة لمعرفة تأثير التآكل المعجل لحديد تسليح الشد السفلي، بثلاث درجات تآكل مختلفة ولثلاث نسب خلط خرسانية مختلفة، على تصرف العتبات الخرسانية المسلحة وسعتها القصوى. وقد تم الحصول على الاستنتاجات التالية:

- أعطت عملية التآكل المعجل باستخدام خلية التآكل الكهربائية المتبعة فقداناً لمساحة مقطع حديد التسليح المتآكل، والذي تم قياسه عن طريق مراقبة كمية التيار المار في حديد التسليح وتطبيق قانون فراداي، حيث أثر بشكل كبير وسلبي على تصرف الانحناء للعتبة المتآكلة.
- إن الظواهر المرافقة لعملية التآكل، ومنها التشققات وتصدع الغطاء الخرساني ولطخات الصدأ على طول منطقة حديد التسليح المتآكل، لا تعني بالضرورة التنبؤ بالنقصان الحاصل في متانة وجساءة العتبات المتآكلة.
- كان نمط التصدع بسبب التآكل ثابتاً لجميع العتبات المتآكلة، حيث بدأت الشقوق في الاتجاه العمودي لحديد التسليح تقريباً في منتصف فضاء العتبة لتنتشر بالاتجاهين العلوي والسفلي للعتبة.
- بدأت التشققات الأولية الناتجة عن التآكل في الظهور بمعدل فقدان وزن لمقطع حديد التسليح المتآكل مقداره ٣.١% اعتماداً على قانون فراداي.
- كان عرض أكبر شق خرساني مرئي نتيجة للتآكل قبل فحص العتبات لا يتجاوز 1 mm بالرغم من التآكل الشديد والتصدع الواضح لخرسانة الغطاء.
- سببت عملية التآكل نقصاناً ملحوظاً في سعة التحمل الأقصى للانحناء للعتبات المتآكلة تناسب مع درجة التآكل، حيث كان أكبر نقصان لسعة التحمل الأقصى مقداره ٣٦% للعتبة R2D.
- كما سببت عملية التآكل نقصاناً في التشوه الأقصى لمنتصف العتبات المتآكلة تناسب مع درجة التآكل، حيث كان اكبر نقصان في التشوه مقداره ٥٤% للعتبة R1D.
- أعطت قراءات انفعال الخرسانة مع عمق العتبة تأثيراً ملحوظاً لتآكل حديد تسليح الشد في زيادة انفعال الخرسانة وزيادة تشققاتها وخاصة في منطقة الشد، وتناسبت هذه الزيادة مع درجة التآكل. كما أوضحت التغير الحاصل مع التحميل لمحور تعادل الإجهادات وانتقاله باتجاه منطقة الضغط.

المصادر :

1- ACI Committee (318-08), "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318 - 08) and Commentary (ACI 318-08)", *American Concrete Institute*, 2008, 459 pp.
2- Yunovich, M., and Thompson, N.G., "Corrosion of Highway Bridges: Economic Impact and Control Methodologies", *Concrete International*, V. 25, No. 1, January 2003, pp. 52-57.

3- Uhlig, H. H., *Corrosion and Corrosion Control*, John Wiley and Sons, New York, 1963.
4- Scully, J. C., *The Fundamental of Corrosion*, Bergaman Press, 3rd edition, 1990.
5- Higgins, C., and Farrow, W., "Tests of Reinforced Concrete Beams with Corrosion-Damaged Stirrups", *ACI Structural Journal*, Vol. 103, No. 1, January-February 2006.
6- هشام أحمد، هشام حامد، وحيدر عليوي، "تأثير الخواص الكهروكيميائية والفيزياوية للخرسانة المسلحة في تصميم الحماية الكاثودية"، *مجلة الهندسة والتكنولوجيا*، المجلد 26 ، العدد ٦، ٢٠٠٨.
7- واثق عيسى، عبد الوهاب حسن، وأحمد حسن، "الحماية الكاثودية لصلب التسليح المطمور في الكونكريت"، *مجلة الهندسة والتكنولوجيا*، المجلد 26، العدد ٣، ٢٠٠٨.
8- المواصفات العراقية رقم (٤٥)، *ركام المصادر الطبيعية المستعمل في الخرسانة والبناء*، الجهاز المركزي للتقييس والسيطرة النوعية، بغداد، ١٩٨٤.
9- Higgins, C.; Farrow, W. C.; Potisuk, T.; Miller, T. H.; Yim, C. S.; Cramer, S. D.; Covino, Jr., B. S.; Holcomb, G. R.; Bullard, S. J.; Ziomek-Moroz, M.; and Matthes, S. A., "Shear Capacity Assessment of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams", *Project SPR 381*, Oregon Department of Transportation, 2003.
10- Shamsad Ahmad, "Techniques for Inducing Accelerated Corrosion of Steel in Concrete", *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 34, No. 2C , December 2009.