مجلة بحوث البناء
المجلد (٩) العدد (١) ٢٠٢٤

حماية حديد التسليح من التآكل في الخرسانة الحاوية على السمنت المقاوم للكبريتات المخلوط مع البوزولانة

*[١]سهير كاظم الحبوبي ، [٢] طارق صالح العطار،[١] نداء طه عيدان ،[١] هدى حميد ناصر، [١] بثينة فنجان حدحود

[١] قسم الانشاءات ، دائرة بحوث البناء ، بغداد ، العراق
[٢] قسم الهندسة المدنية ، الجامعة التكنولوجية ، بغداد ، العراق

الخلاصة

ان المدى الواسع من المشاكل الانشائية الناتجة عن تآكل حديد التسليح في المقاطع الإنشائية تجعلها واحدة من المشاكل المهمة التي تواجه مختلف بلدان العالم. يهدف البحث لاختبار كفاية المتطلبات الواردة في الكودة العربية لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة فيما يخص متطلبات الخرسانة المسلحة المعرضة لظروف محيطة أو ضارة أو لماء البحر وتشمل هذه المتطلبات الحد الادنى لمحتوى السمنت والحد الاقصى لنسبة الماء الى السمنت لتامين الديمومة فضلا عن دراسة تأثير الاستبدال الجزئي للمواد البوزولانية (الميتاكاؤولين، غبار السيليكا) من وزن السمنت على زيادة حماية حديد التسليح من التآكل.

تم تحضير خرسانة مسلحة مرجعية بمحتوى سمنت ٤٠٠ كغم/م^{٣} ومقاس أقصى للركام ٢٠ ملم ونسبة ماء الى سمنت ٠,٤ كذلك تم تحضير خلطات خرسانية مسلحة اخرى بتعويض جزئي من وزن السمنت بمواد بوزولانية (الميتاكاؤولين. غبار السيليكا) واختبار فاعلية جميع هذه الخلطات لمقاومة تآكل حديد التسليح في الخرسانة المغمورة جزئيا في محلول كلوريد الصوديوم NaCl بتركيز ٤,٥٪. تم التوصل الى ان استخدام المواد البوزولانية يقلل من تيار تآكل حديد التسليح لأكثر من ٥٠٪ عنه في الخرسانة المرجعية.

الكلمات الرئيسية: بوزولانة، تآكل، ديمومة، غبار السيليكا، ميتاكاؤولين

*المؤلف المراسل : سهير كاظم الحبوبي

suhairkah@yahoo.com

١- المقدمة

تتعرض بلدان منطقة الخليج العربي الى مشكلة تآكل حديد التسليح في المنشآت الخرسانية المسلحة بشكل أقسى نتيجة عدة عوامل منها الظروف المناخية القاسية المتمثلة بارتفاع درجات الحرارة والرطوبة وارتفاع نسبة الملوحة بالمياه وتلوث المواد المستخدمة في انتاج الخرسانة بالأملاح وخاصة الركام والممارسات الإنشائية الخاطئة.

تحمي الخرسانة حديد التسليح طبيعيا من الصدأ وذلك لان المحيط القاعدي للخرسانة يشكل طبقة حماية رقيقة من أوكسيد الحديد ولكن وبسبب نفاذية الخرسانة فان عوامل التآكل قد تخترق الخرسانة وصولا الى حديد التسليح محطمة طبقة الحماية تلك [١].

ان تدهور الخرسانة نتيجة تآكل حديد التسليح يحدث بسبب ان نواتج الصدأ تحتل حجما أكبر من حجم الحديد مسلطة بذلك جهدا على الخرسانة المحيطة بحديد التسليح ومؤدية الى حدوث تشققات وظهور بقع الصدأ وقد تؤدي الى تشظي الغطاء الخرساني , وباستمرار عملية التآكل فان مساحة المقطع العرضي لحديد التسليح تبدأ بالنقصان ومع الوقت يحدث الفشل الانشائي اما بسبب فقدان الترابط ما بين حديد التسليح والخرسانة او بسبب نقصان مساحة المقطع العرضي لحديد التسليح وان هذا العامل الأخير يعتبر خطراً جدا في المنشآت التي تحوي حديد مسبق الجهد حيث يكون قطر حديد التسليح قليلا بحيث ان أي نقصان يحصل بسبب التآكل قد يؤدي الى الانهيار [١]، وكنتيجة لذلك فان العديد من الوسائل والمستلزمات قد تم استخدامها لتحسين ديمومة الخرسانة المسلحة في هذا الجانب ومنها:

١- استخدام خرسانة بمحتوى واطئ من الماء الى السمنت
٢- استخدام حديد مطلي بالايبوكسي
٣- معالجة سطح خرسانة بمادة تمنع او تقلل نفوذ المحاليل
٤- استخدام تقنية الحماية الكاثودية
٥- استخدام المضافات الكيمياوية والبوزولانية ضمن بنية الخرسانة [٢]
٦- وسائل أخرى

عندما تكون الخرسانة معرضة لتأثير الكبريتات يتم في الغالب استخدام السمنت المقاوم للأملاح الكبريتية وذلك لانخفاض نسبة مركب ثلاثي سيليكات الكالسيوم C_3S ولكن هذا المركب تكون زيادته مفيدة في حالة تعرض الخرسانة لتأثير الكلوريدات حيث يتفاعل المركب مع الكلوريدات ويكون ملحا غير ضار بالخرسانة وبذلك يقلل من تركيز ايون الكلوريد الحر في الخرسانة ويقل خطره على حديد التسليح ومن خلال معرفة التركيب الكيمياوي لبعض انواع البوزولانا التي تحتوي ضمن تركيبها على الالومينا ومثال على ذلك مادة الميتاكاؤولين بالأماكن اعطاء حل للخرسانة التي تكون معرضة لتأثير الكبريتات والكلوريدات معا باستخدام سمنت مقاوم مخلوط مع مادة الميتاكاؤولين لذا يهدف البحث الى:

أ. اختبار كفاية المتطلبات الواردة في جدول رقم (٢-١٢) من المدونة العربية للخرسانة المسلحة (مدونة تصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة -١٩٩٧). الباب الثاني. الفقرة ٢-٥-٦فيما يخص متطلبات الخرسانة المسلحة المعرضة لظروف محيطة أو

ضارة أو لماء البحر وتشمل هذه المتطلبات الحد الادنى لمحتوى السمنت والحد الاقصى لنسبة الماء الى السمنت لتامين الديمومة

ب. بحث تأثير الاستبدال الجزئي للسمنت لمادة الميتاكاؤولين على زيادة حماية حديد التسليح من التآكل

ت. بحث تأثير إضافة مادة غبار السيليكا على حماية حديد التسليح من التآكل وتأثير التفاعل الكيميائي للبوزولانة على تآكل حديد التسليح

١-١ تآكل حديد التسليح في الخرسانة

ان صدأ الحديد هو عملية كهروكيميائية تحدث عند السطح الفاصل بين حديد التسليح والخرسانة وتحتاج إلى عامل مؤكسد (الأوكسجين) ورطوبة وتيار من الإلكترونات يسرى من قطب موجب إلى قطب سالب في المعدن ويجب توفر الوسط الذي ينقل التيار الكهربائي من القطب الموجب إلى السالب وهو عادة ماء أو محلول مائي به أملاح ذائبة وتحدث في هذه العملية مجموعة من التفاعلات الكيميائية على النحو التالي شكل رقم (١)

١. يتحلل الحديد من القطب الموجب على هيئة أيونات الحديدوز $(Fe)^{+2}$ حسب التفاعل:

$$2Fe \rightarrow 2Fe^{+2} + 4e^{-} \cdots (١)$$

٢. تنتقل الإلكترونيات المتولدة من التفاعل السابق (4e-) عبر الحديد الى منطقة القطب السالب حيث تتفاعل مع الأوكسجين والماء مكونة أيونات الهيدروكسيل (OH) حسب التفاعل:

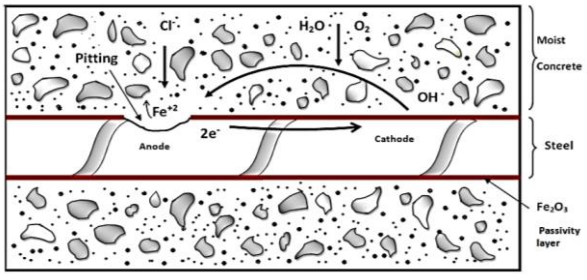
$$2H2O + O2 + 4e \rightarrow 4(OH) \cdots (٢)$$

٣. عند تقابل نواتج التفاعلين -أيونات الحديدوز مع أيونات الهيدروكسيل- يترسب هيدروكسيد الحديدوز وفقاً للتفاعل:

$$2Fe^{+2} + 4(OH) \rightarrow 2Fe\ (OH)2 \cdots (٣)$$

٤. يتأكسد هيدروكسيد الحديدوز الناتج بفعل الأوكسجين والماء إلى هيدروكسيد الحديديك - تفاعل ثانوي- الذي يتحلل مكوناً صدأ الحديد (أكسيد الحديد) طبقاً للتفاعل:

$$2Fe(OH)2 \rightarrow O2 + H_2O \rightarrow 2Fe\ (OH)3Fe2O3H2O \cdots (٤)$$



شكل رقم (١): عملية تآكل حديد التسليح في الخرسانة

ويعتبر أكسيد الحديد الناتج شديد الامتصاص للماء وضعيف الالتصاق بالحديد. وبذلك يسهل إزالته بالذوبان البطيء تاركاً سطح الحديد ليسمح بتكون صدأ جديد ويمكن عن طريق قياس التيار الكهربائي في قضبان الحديد الصدأة معرفة الصدأ في الحديد التي يصعب الكشف عنها. وهذا يساعد على تحديد درجة خطورة المنشآت الخرسانية المعرضة للصدأ وهيدروكسيد الحديد الناتج يزيد حجمه عن حجم الحديد الأصلي زيادة كبيرة مما يؤدى إلى تولد إجهادات انفصالية عالية حول قضبان التسليح تؤدى إلى شقوق طولية موازية للقضبان وعند زيادة الصدأ عن ذلك تبدأ الخرسانة السطحية في التساقط [٣].

١-٢ المواد البوزولانية

ان مصطلح بوزولانا أتى من الرماد البركاني المأخوذ من قرية بوزولي (Pozzuoli) بالقرب من نابولي - ايطاليا بعد ثوران بركان جبل فيسوفيس (Vesuvius) بحدود عام ٧٩ بعد الميلاد على الرغم من ثبوت استخدامها قبل ٢٠٠٠ عام قبل الميلاد في الحضارات القديمة مبينة اهمية هذه المواد في استمرار ديمومتها [٤]

البوزولانا هي مواد سيليكية او الومينوسيليكية عندما تطحن بنعومة عالية وبوجود الرطوبة فإنها تتفاعل كيميائيا مع هيدروكسيد الكالسيوم ($Ca(OH)_2$) المتحرر عن اماهة السمنت [٤]، مكونة مركبات غير قابلة للذوبان مثل سيليكات والومينات الكالسيوم والتي تعمل على سد الفجوات الداخلية والمسام الشعرية [٢،] ويؤدي ذلك الى تحقق مقاومة اختراق للمحاليل القاسية وان تفاعلها أبطأ من اماهة السمنت وذلك يعني ان تأثير المواد البوزولانية يتحقق في حالة استمرار المعالجة الرطبة للخرسانة لمدة أطول [٥].

تعتبر المواد البوزولانية ضرورية في صناعة الخرسانة عالية الأداء (إما كإضافة أو كإبدال جزئي من وزن السمنت) لما لها من تأثير على أداء وديمومة الخرسانة كما أنها تستخدم أيضا في الحصول على مقاومة انضغاط عالية للخرسانة ومن هذه المواد المستخدمة ما يلي:

أ. غبار السيليكا (Silica Fume): وهومنتج ثانوي ينتج من مصانع السيليكون ذا نعومة عالية يجب أن يطابق غبار السيليكا متطلبات المواصفة الامريكية ASTM C1240 [٤]

ب. الرماد المتطاير (Fly Ash): هو منتج ثانوي في محطات الكهرباء التي تدار بالفحم الحجري. وتختلف جودة الرماد المتطاير من محطة إلى أخرى وحتى في نفس المحطة يجب ان يطابق الرماد المتطاير متطلبات المواصفة الامريكية ASTM C618 [٤]

ت. خبث الافران المنعم pulverized furnace slag: وهو يتكون من سيليكات أو الومينو سيليكات الكالسيوم المتشكلة بالترافق مع انتاج الحديد ويتم تبريد الخبث المصهور بدرجة ١٥٠٠ °م بشكل مباشر بالماء مكونا حبيبات مزججة تشبه الرمل تطحن لنعومة أقل من ٤٥ مايكرون [٤] يجب ان يطابق خبث الافران متطلبات المواصفة الامريكية ASTM C989

ث. الميتاكاؤولين (Metakaolin): وينتج عن حرق طين الكاؤولين بدرجات حرارة مناسبة الميتاكاؤولين العالي الفعالية هو عبارة عن بوزولانة الومينوسليكات الفعالة التي تتشكل بفعل حرق الكاؤولين المنقى بدرجة حرارة محددة ($\Delta 700°C$) هذه المعالجة الحرارية تحطم البنية للكاؤولين ويصبح مناسباً للاستخدام كمادة سمنتية إضافية

$$Al2O32SiO22H2O \rightarrow Al2O32SiO2 + 2H2O \uparrow \cdots (٥)$$

عند تفاعل الميتاكاؤولين مع هيدروكسيد الكالسيوم $Ca(OH)_2$ الناتج من ماء السمنت البورتلاندي. يؤدي إلى تشكيل مركبات سمنتية جديدة تلك المركبات الجديدة التي تشكلت سوف تسهم في إضافة المقاومة للسمنت وتساعد على تحسين خواص الديمومة للخرسانة

إن المواد التي تبدي خواص بوزولانية أو خواص هيدروليكية يمكن تعويضها بجزء من وزن كلنكر السمنت البورتلندي. مما يقلل بذلك استهلاك الطاقة والمواد الأولية اللازمة لتصنيع السمنت وكذلك تقليل التلوث المرافق لإنتاجه إن عدة إضافات معدنية أثبتت فعاليتها في الحد من اختراق الأيونات القاسية. ولهذا فإن البحوث في هذا المجال قد حققت نتائج مهمة فيما يخص ديمومة المنشآت الخرسانية المسلحة [٥]

وتبعاً للمواصفة الأمريكية رقم ASTM C618. التي تصنف البوزولانا الطبيعية إلى ثلاثة أصناف (Class N, Class F, Class C). حيث تخص بعض أنواع الرماد المتطاير والرماد البركاني. فإن المواد التي تحتاج إلى الحرق لتهيئتها كمادة بوزولانية مثل الميتاكاؤولين يجب أن تحتوي على مجموع محتوى أكاسيد (السيليكا والألومينا والحديد) يتجاوز ٧٠٪.

إن مادة الميتاكاؤولين تحتوي على الألومينا أكثر من بقية المواد. في حين تحتوي مادة غبار السيليكا على محتوى عالٍ من السيليكا ومحتوى قليل جداً من الألومينا وبقية العناصر وقد أثبتت البحوث الفعالية البوزولانية لكلا النوعين على الرغم من اختلاف التركيب الكيميائي لكليهما. لذا فقد اختيرت هاتين المادتين في هذا البحث لتقييم ديمومة الخرسانة وتآكل حديد التسليح في الخرسانة المعرضة لتأثير الأملاح الخارجية.

١-٣ تأثير السمنت والمواد البوزولانية على تآكل حديد التسليح

تتواجد أيونات الكلوريد في الخرسانة بشكلين: متحدة وحرة تشارك أيونات الكلوريد الحرة (تلك الذائبة في المسام) فقط في عملية التآكل وذلك لأن أيونات الكلوريد تتحد مع ثلاثي ألومينات الكالسيوم (C_3A) الموجودة في مونة السمنت لتشكيل (الملح الفريد) ($3CaO \bullet AL_2O_3 \bullet CaCl_2 \bullet 10H_2O$) غير الضار بالخرسانة والخرسانة المصنوعة من السمنت ذات محتوى C_3A العالي لديها إمكانيات أكبر لربط أيونات الكلوريد [٦].

بين هانسون [٧] الآثار المفيدة لهذا السمنت من خلال رفع محتوى C3A في السمنت من ٢٤٣٪ إلى ١٤٪ مع بقاء جميع العوامل الأخرى ثابتة. فإن الكلوريد الحرج (الذي يسبب التآكل) يزداد بمعدل ٢٨٥

لقد تم بحث تأثير السمنت والبوزولانا من قبل العديد من الباحثين بودي [٨] الذي درس مقاومة اختراق الكلوريد للخرسانة الحاوية على الميتاكاؤولين بنسب تعويض مختلفة (٨٪ و١٢٪)

من وزن السمنت ونسب ماء إلى سمنت (٠,٣ و٠,٤). لاحظ أنه بزيادة نسبة الميتاكاؤولين ونقصان نسبة الماء إلى السمنت. تقل نفاذية الخرسانة وتزداد مقاومتها الكهربائية.

في بحث تم نشره عام ٢٠١٣ لدراسة تأثير نسب تعويض مختلفة من الميتاكاؤولين على سلوك التآكل لحديد التسليح في مونة سمنتية معرضة لمحلول كلوريد الصوديوم بتركيز ٣,٥٪ وكبريتات المغنيسيوم بتركيز ٥٪. استخدمت مادة الميتاكاؤولين كتعويض جزئي من وزن السمنت بالنسب (٢٠٪. ١٥٪. ١٠٪. ٥٪) أظهرت فحوص التآكل أن نسبة تعويض ٢٠٪ ميتاكاؤولين أبدت مقاومة جيدة للتآكل في محلول كلوريد الصوديوم. في حين أن نسبة تعويض ٥٪ ميتاكاؤولين هي النسبة التي تقلل التآكل في محلول كبريتات المغنيسيوم [٩]

وفي دراسة طويلة الأمد أجريت على الخرسانة المرجعية بمقاومة انضغاط مختلفة (٤٠,٣٠,٢٠) نيوتن/ملم^{٢}تم تعويض البوزولانا جزئيا من وزن السمنت كالاتي (الرماد المتطاير بنسبة تعويض ٢٠٪ من وزن السمنت وخبث الافران المنعم بنسبة تعويض ٤٠٪ من وزن السمنت) أثبتت الدراسة ان معدل التآكل لحديد التسليح في الخرسانة الحاوية على الرماد المتطاير كانت أقل ب (١,٦,١٧,٩) للخرسانة ذات المقاومة (٤٠,٣٠,٢٠) نيوتن/ملم^{٢} على التوالي كما اثبتت الدراسة ان معدل التآكل لحديد التسليح في الخرسانة الحاوية على الخرسانة الحاوية على الخبث المنعم كانت أقل ب (٢,٥,٦,١٠) مرة للخرسانة ذات المقاومة (٤٠,٣٠,٢٠) نيوتن/ملم^{٢} على التوالي حيث يلاحظ ان تأثير البوزولانا أكثر وضوحا في الخرسانة ذات المقاومة القليلة عما في الخرسانة عالية المقاومة توصلت الدراسة كذلك الى ان تقليل القاعدية في الخرسانة الحاوية على الرماد المتطاير والخبث المنعم ل ٦ و١٠ مرات على التوالي مقارنة بالخلطة المرجعية لم تؤثر على تآكل حديد التسليح بسبب نواتج التفاعل البوزولاني التي تقلل النفاذية ولكن يوصى بان لا يقل محتوى السمنت عن ٣٥٢ كغم/م٣ للحد من أثر الكلوريد ومن النتائج الأخرى التي توصلت لها الدراسة أن الخرسانة ذات مقاومة انضغاط ٤٠ نيوتن/ملم٢ ولها نسبة ماء الى سمنت ٠٤٢ وبمحتوى سمنت ٤٥٢ كغم/م٣ أبدت كفاءة أفضل من أنواع الخرسانة الأخرى ذات المقاومة الأقل (بدون بوزولانا) [١٠]

لقد استخدم الميتاكاؤولين المحلّي بنجاح لإنتاج الخرسانة عالية الأداء في عدة بحوث في بحث أُجري في عام ٢٠٠٥. تم تحضير الميتاكاؤولين من حرق الكاؤولين (أطيان الكاؤولين العراقية المستخدمة كانت من منطقة الدويخلة). وتم طحن وتنعيم الكاؤولين باستخدام جهاز العصف الكهربائي بدرجات حرارية مختلفة (٧٥٠, ٧٠٠, ٦٥٠, ٦٠٠, ٥٥٠) °م ولمدة نصف ساعة لتحديد درجة الحرق المثلى. وكانت ٧٠٠°م هي الدرجة المثلى للحرق بعد ذلك. تم حرق الكاؤولين بهذه الدرجة ولكن بزمن إبقاء عند الحرارة القصوى مختلف (٢. ١٥. ١. ٠٥) ساعة. وكان أفضل زمن إبقاء والذي أعطى أفضل كلسنة للكاؤولين هو ساعة تم استخدام الميتاكاؤولين بنسبة تعويض ١٠٪ من وزن السمنت والمضاف الملدن المتفوق لإنتاج خرسانة عالية المقاومة بمقاومة انضغاط مقدارها ٨١ ميكاباسكال. [١١] في بحث آخر. تم التوصل إلى أن الخرسانة الحاوية على المضاف المقلل للماء بدرجة متفوقة يؤدي إلى تحسن كبير في مقاومة الانضغاط ومقاومة شد الانفلاق ومقاومة الانثناء والمقاومة الكهربائية

ومقاومة الصدمة وسرعة الموجات الصوتية. وكذلك يقلل الامتصاص بدرجة كبيرة بينما أظهرت الخرسانة الحاوية على الميتاكاؤولين العالي الفعالية بنسبة ٨٪ من وزن السمنت تحسنًا كبيرًا في تلك الخواص. إذ كان التحسن الحاصل في الخرسانة الحاوية على المضاف المقلل للماء بدرجة متفوقة فقط لقد أُنتجت خرسانة بمقاومة انضغاط مقدارها ٧١ ميكاباسكال بعمر ٢٨ يوماً باستخدام محتوى (سمنت. ماء. حصى. رمل. ميتاكاؤولين) (٥٠٦. ٤٤. ٥٧٢. ١٠٤٣. ١٥٩) كغم/م^3 على التوالي. وبإضافة الملدن المتفوق بنسبة ٦٪ من وزن السمنت. [١٢]أما فيما يخص الديمومة فقد تم التوصل الى ان استخدام محتوى سمنت بنسبة عالية مع استخدام الميتاكاؤلين والمضافات المقللة للماء بدرجة متفوقة ادت الى تحسن كبير في ديمومة الخرسانة لمقاومة هجوم ايون الكلور المسبب لصدأ حديد التسليح [١٣]وكذلك أظهرت نتائج الفحوص الكهروكيميائية لبحث اخر إمكانية إنتاج خرسانة عالية الاداء باستخدام الميتاكاؤولين بالاشتراك مع المضاف الملدن المتفوق حيث توفر حماية ممتازة لحديد التسليح مع الوقت [١٤] كما تم استخدام الميتاكاؤولين لإنتاج خرسانة عالية الاداء وذاتية الرص [١٥]و [١٦]. يلاحظ ان معظم البحوث التي اجريت على مادة الميتاكاؤولين المحلية استخدمت لإنتاج خرسانة عالية الاداء بمشاركة المضاف المقلل للماء بشكل متفوق Superplasticizer ولكن القليل من البحوث المحلية أجريت على السمنت المقاوم للكبريتات المخلوط بمادة الميتاكاؤولين واجراء فحوص تآكل حديد التسليح حيث من المعلوم ان السمنت المقاوم يعتبر قليل المقاومة للكلوريدات وذلك لان نسبة الـC_3A فيه تكون قليلة على العكس من السمنت الاعتيادي حيث يعتبر الاخير مناسبا في المنشاءات المعرضة لتاكل حديد التسليح بسبب نسبة C_3A العالية التي يمكنها ان تتحد مع الكلوريدات وتكون ملحا غير ضار بالخرسانة وبنفس الوقت تقلل من الكلوريدات الحرة المسببة لتآكل حديد التسليح ما في حالة تعرض الخرسانة للتأثير المشترك من الكلوريدات والكبريتات فبالإمكان استخدام السمنت المقاوم للكبريتات الذي يخلط مع البوزولانة التي تحتوي على الالومينا لتقليل محتوى الكلوريدات وهذا البحث قد تم اجراءه لتقييم كفاءة السمنت المقاوم للكبريتات المخلوط مع الميتاكاؤولين (الذي يحتوي على الالومينا) في الحد من تأكل حديد التسليح.

١-٤ المدونات والمواصفات الخاصة بالمواد البوزولانية وعلاقتها بتآكل حديد التسليح

أولت المدونات العالمية اهتماما بديمومة الخرسانة المسلحة وفيما يتعلق بتآكل حديد التسليح وضعت متطلبات ومحددات للخرسانة المسلحة لحماية حديد التسليح تصنف المدونة الأمريكية ACI 318-2011 ظروف تعرض الخرسانة الى مجاميع حسب نوع التعرض وفيما يخص تآكل حديد التسليح فإنها تصنف الخرسانة الى ثلاثة أصناف هي (C2,C1,C0) حيث C0 تخص الخرسانة المسلحة الجافة غير المعرضة للمياه المالحة فتحدد محتوى ايون الكلوريد الذائب بالماء فيها بنسبة لا تتجاوز ١% من وزن السمنت. أما C1 (متوسط) فهي الخرسانة المسلحة المعرضة للمياه ولكن ليست للمصادر الخارجية من الكلوريد وتحدد محتوى ايون الكلوريد فيها بنسبة لا تتجاوز ٠,٣٪ من وزن السمنت أما C2 (شديد) فهي تخص الخرسانة

المسلحة أو المعرضة للمياه المالحة ومياه البحر أو مذيبات الجليد وتحدد محتوى ايون الكلوريد فيها بنسبة لا تتجاوز ٠,١٥٪ من وزن السمنت وكذلك تعطي المدونة أعلاه محددات أخرى للنوع الشديد C2 لحماية حديد التسليح في الخرسانة المعرضة للمحاليل الملحية الخارجية ومنها تحديد نسبة الماء الى السمنت ب (٠,٤) ومقاومة انضغاط الخرسانة لا تقل عن ٣٥ نيوتن/ملم^{٢} وتحديد سمك الغطاء الخرساني الجدول رقم (١) يبين محددات بعض المدونات العالمية والعربية لخرسانة مسلحة ذات مقاس ركام اقصى ٢٠ ملم علما بان هذه المدونات تعطي تعديلات مناسبة في حالة تغير المقاس الأقصى للركام عما مذكور أعلاه.

جدول (١): محددات بعض المدونات العالمية والعربية لخرسانة مسلحة والمقاس الأقصى للركام ٢٠ ملم ولمقاومة انضغاط أكثر من ٢٥ نيوتن/ملم^{٢}

المحددات	المدونة الامريكية ACI 318-2011	المدونة البريطانية 8110: Part 1:1985	المدونة الهندية IS 456:2000	مدونة تصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية- [١٧]١٩٩٧
نسبة الماء الى السمنت (حد اعلى)	٠,٤	٠,٤٥	٠,٤٥	٠,٤٢
سمك الغطاء الخرساني (ملم) (حد أدنى)	٥٠ ملم للجدران والسقوف و٦٢ملم لبقية العناصر الانشائية	٥٠	٥٠	٣٥ ملم للجدران والبلاطات و٤٠ ملم لبقية العناصر
مقاومة الانضغاط نيوتن/ملم٢ (حد أدنى)	٣٥	٣٥	٣٥	-
محتوى السمنت كغم/م٣	-	٣٢٥	٣٤٠	٤٠٠

٢- الجانب العملي

٢-١ المواد المستخدمة

٢-١-١ السمنت

السمنت المستخدم في هذا البحث هو سمنت بورتلاند مقاوم للكبريتات. المصنع من قبل شركة السمنت المتحدة. المعروف تجارياً باسم (طاسلوجة- بازيان) وقد أجريت له الفحوصات الفيزيائية والكيميائية في دائرة بحوث البناء. والنتائج موضحة في الجدولين (٢) و (٣) على التوالي يلاحظ أن الخواص الفيزيائية والكيميائية مطابقة للمواصفة العراقية (مقع/١٩٨٤/٥)

٢-١-٢ الركام الناعم

تم استخدام الركام الناعم (الرمل) من مقالع منطقة الأخيضر. وتم فحص خواصه الفيزيائية في دائرة بحوث البناء. وهو مطابق للمواصفة العراقية القياسية (مقع/١٩٨٤/٤٥) كما هو موضح بالجدول (٤) وتم فحص محتوى أيون الكلوريد في دائرة بحوث المواد التابعة لوزارة العلوم والتكنولوجيا بواسطة جهاز الكروماتوغرافيا الأيونية.

٢-١-٣ الركام الخشن: تم استخدام حصى مكسّر مقاسه الأقصى (٢٠ ملم) وقد تم الحصول عليه من منطقة النباعي وتم فحص خواصه الفيزيائية في دائرة بحوث البناء. وهو مطابق للمواصفة العراقية القياسية (مقع/٤٥/١٩٨٤) كما موضح بالجدول (٥)

جدول (٢): الخواص الفيزيائية للسمنت

الخواص الفيزيائية	نتائج الفحص	حدود المواصفة العراقية (مقع /٥ / ١٩٨٤)
النعومة (بطريقة Blaine) سم٢/ غم	٣٤٠٢	لا تقل عن ٢٣٠٠ سم٢ / غم
زمن التماسك الابتدائي. (دقيقة: الساعة) النهائي. (دقيقة: الساعة)	 ١:٤٠ ٤:١٥	 لا يقل عن ٤٥ دقيقة لا يزيد عن ١٠ ساعات
مقاومة الانضغاط (ميكا باسكال) ٣ أيام ٧ أيام	 ٣٣ ٣٩	 لا يقل عن ١٥ ميكا باسكال لا يقل عن ٢٣ ميكا باسكال

جدول (٣): الخواص الكيمائية للسمنت

الخواص الكيمائية	المحتوى %	حدود المواصفة العراقية (مقع /٥ / ١٩٨٤)
اوكسيد الكالسيوم (%)	٦٢,٦٤	-
اوكسيد السليكون (%)	٢١,٦	-
اوكسيد الالومنيوم (%)	٣,٩٧	-
اوكسيد الحديد (%)	٥,٠٧	-
الاملاح الكبريتية (%)	٢,٤	محتوى SO_3 (%) لا يزيد ٢,٨ عندما تكون نسبة (C_3A) أكثر من ٥ %
اوكسيد المغنسيوم (%)	٢,٨٩	لا يزيد عن ٥ %
المواد القابلة للذوبان (%)	١,٠٢	لا تزيد عن ١,٥ %
الفقدان بالحرق (%)	١,٣٨	لا يزيد عن ٤ %
عامل الاشباع الجيري (%)	٠,٨٨	٠,٦٦- ١,٠٢
المركبات الرئيسية % بموجب معادلات Bogue		
سيليكات ثلاثي الكالسيوم (C_3S)		٤٦,٣٦
سيليكات ثنائي الكالسيوم (C_2S)		٢٧,٢
الومينات ثلاثي الكالسيوم (C_3A)		٢,٤٥
حديد الومينات رباعي الكالسيوم (C_4AF)		١٥,٣٢

جدول (٤): خواص وتدرج الركام الناعم

مقاس فتحات الغربال (ملم)	النسبة المئوية العابرة وزنا	حدود المواصفة العراقية (مقع /٤٥ / ١٩٨٤) منطقة التدرج رقم (٢)
١٠	١٠٠	١٠٠
٤,٧٥	٩٠	١٠٠-٩٠
٢,٣٦	٧٤,٥	١٠٠-٧٥
١,١٨	٦٣	٩٠-٥٥
٠,٦	٤٤,٤	٥٠-٣٥

جدول (٤): تابع

٠,٣	١٤,٨	٣٠-٨
٠,١٥	٣	١٠-٠
معامل النعومة	٣,١	-
محتوى الأملاح الكبريتية	٠,٠٤٧ %	لا تزيد عن ٠,٥ %
محتوى الكلوريد Cl^-	٠,٠٠٨٨	

جدول (٥): خواص وتدرج الركام الخشن

مقاس فتحات الغربال (ملم)	مقاس فتحات الغربال (ملم)	النسبة المئوية العابرة وزنا
٢٠	٢٠	١٠٠
١٠	١٠	٣٧
٥	٥	٢,٨
محتوى الأملاح الكبريتية	محتوى الأملاح الكبريتية	٠,٠٧ %
محتوى الكلورايد Cl^-	محتوى الكلورايد Cl^-	٠,٠١٧

٢-١-٤ غبار السيليكا

ان مادة غبار السيليكا تم شراؤها من الاسواق المحلية وهي مادة بوزولانية عالية الفعالية بمحتوى سيليكا مقداره ٩٣,٤٧٪وبمساحة سطحية مقدارها ٢١ م٢/غم ولها فعالية بوزولانية مقدارها ١٢٥٪ وتم اضافتها كبديل من وزن السمنت بنسبة ١٢,٥٪ وتم اجراء التحليل الكيمياوي وفحص الفعالية البوزولانية لها بموجب المواصفة الامريكية ASTM C1240-03 وطابقت مواصفاتها لمتطلبات المواصفة اعلاه

٢-١-٥ الميتاكاؤولين

أطيان الكاؤولين العراقية المستخدمة في هذا البحث كانت من منطقة كعرة ويتم تحضير الميتاكاؤولين بطحن الكاؤولين بطريقة العصف الكهربائي ويحرق بالفرن حتى (٧٥٠١٠ ±) درجة سيليزية ولمدة ساعتين وبعدها يبرد الميتاكاؤولين الى درجة حرارة الغرفة لمدة ٢٤ ساعة اجري فحص خواصه الكيميائية والفيزيائية وتبين ان الميتاكاؤولين العالي الفعالية من صنف (N) ومطابق للمواصفة الأمريكية(ASTM C-618/03) كما موضح في الجدول (٦) ويمتلك فعالية بوزولانية مقدارها ١٠٠٪ في عمر ٢٨ يوم.

جدول (٦): التحليل الكيميائي الميتاكاؤولين العالي الفعالية

المركبات	المحتوى %	المواصفة ASTM - 618 /03
SiO_2	٥٢,٩٦	الحد الأدنى ٧٠٪
Al_2O_3	٣٣,٧٨	
Fe_2O3	٠,٣٧	
CaO	٢,١٢	
MgO	١,٠٧	
SO_3	٠,١٢	الحد الأعلى ٤٪
LOI	٨,٩٧	الحد الأعلى ١٠٪

٢-٢ الخلطات الخرسانية

تم اجراء عدة خلطات تجريبية معتمدة على الحدود المسموحة في (مدونة تصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة -١٩٩٧) (الكودات العربية الموحدة لتصميم وتنفيذ المباني) حيث تم تحديد محتوى السمنت ب ٤٠٠ كغم/م^3 ونسبة الماء الى السمنت ب ٠,٤٢ للخرسانة المسلحة المعرضة لتأثير املاح الكلوريدات تم اعتماد خلطات وهي الخلطة المرجعية والخلطة الحاوية على الميتاكاؤولين بنسبتي تعويض ١٢,٥ و٢٠ % من وزن السمنت والخلطة الحاوية على غبار السيليكا بنسبة تعويض ١٢,٥٪ من وزن السمنت والجدول رقم (٧) يبين الخلطات الخاصة بالبحث يلاحظ زيادة حاجة الخرسانة الحاوية على المواد البوزولانية للماء بسبب زيادة النعومة والتركيب الكيميائي.

جدول (٧): الخلطات الخاصة بالبحث

الخلطات / المكونات	الخلطة المرجعية	مك ١٢,٥ *	مك ٢٠ **	س ١٢,٥ ***
السمنت كغم /م^3	٤٠٠	٣٥٠	٣٢٠	٣٥٠
الرمل كغم /م^3	٧٥٠	٧٥٠	٧٥٠	٧٥٠
الحصى كغم /م^3	١٠٣٥	١٠٣٥	١٠٣٥	١٠٣٥

جدول (٧) : تابع

الماء كغم /م^3	١٦٨	١٨٠	١٨٦	١٨٠
ميتاكاؤولين كغم /م^3	ـــ	٥٠	٨٠	ـــ
غبار السليكا كغم /م^3	ـــ	ـــ	ـــ	٥٠
نسبة الماء الى مجموع المواد السمنتية W/Cm	٠,٤٢	٠,٤٥	٠,٤٦٥	٠,٤٥
الهطول حسب المواصفة الامريكية ASTM C-143-143M	٩٠ ملم	٩٠ ملم	٨٠ ملم	٧٠ ملم

*مك ١٢,٥: هي الخلطة الحاوية على الميتاكاؤولين بنسبة تعويض ١٢,٥٪ من وزن السمنت
**مك ٢٠: هي الخلطة الحاوية على الميتاكاؤولين بنسبة تعويض ٢٠٪ من وزن السمنت
***س ١٢,٥: هي الخلطة الحاوية على غبار السيليكا بنسبة تعويض ١٢,٥٪ من وزن السمنت

٢-٣ الفحوص

٢-٣-١ فحص الانضغاط

اجري فحص مقاومة الانضغاط بموجب المواصفة البريطانية (BS1881-part116:1983) وباستعمال جهاز (TONIPACT Digital Testing) وبسعة تحميل (2000 KN) وتم استخدام نماذج مكعبة الشكل بإبعاد (١٠٠×١٠٠×١٠٠) ملم للخلطات الخرسانية وتستخرج مقاومة الانضغاط من حاصل قسمة الحمل على مساحة الوجه المعرض للحمل

٢-٣-٢ فحص الامتصاص السطحي

تم اجراء الفحص بموجب المواصفة البريطانية BS1881 part 5 على نماذج خرسانية بأبعاد (١٠٠×١٠٠×١٠٠) ملم بعمر ٢٨ يوم فحص الامتصاص السطحي (ISA). هو معدل تدفق الماء في الخرسانة في وحدة المساحة في فترات زمنية محددة من بداية الفحص وتحت ضغط من ارتفاع ٢٠٠ ملم عندما يصبح الماء في تماس مع الخرسانة الجافة يتم امتصاصه عن طريق الخاصية الشعرية والجدول رقم (٨) يوضح الحدود المثالية لهذا الفحص [١٨]

جدول (٨): الحدود المثالية لفحص الامتصاص السطحي[١٨]

مدة الفحص	الامتصاص السطحي ml/m^2/sec		
	قليل	متوسط	عالي
١٠ دقائق	٠,٢٥<	٠,٥- ٠,٢٥	٠,٥ >
٣٠ دقيقة	٠,١٧<	٠,٣٥-٠,١٧	٠,٣٥ >
ساعة	٠,١<	٠,٢-٠,١	٠,٢ >
ساعتين	٠,٠٧<	٠,١٥-٠,٠٧	٠,١٥ >

٢-٣-٣ فحص النفاذية تحت تأثير ضغط الماء

تم اجراء فحص النفاذية بموجب المواصفة البريطانية (**BS EN 12390-8:2009**) وذلك باستخدام جهاز فحص النفاذية على نماذج خرسانية بأبعاد (١٥×١٥×١٥) سم بعمر ٢٨ يوم وبتسليط ضغط (٥٠٠ ±٥) كيلو باسكال لمدة (٧٢ ±٢) ساعة بعد ذلك يتم فحص النماذج بفحص الانشطار وقياس ارتفاع عمود الماء النافذ بالملمتر والشكل رقم (٢) يبين شكل جهاز فحص النفاذية

شكل رقم (٢): جهاز فحص النفاذية تحت ضغط الماء

٢-٣-٤ قياس الدالة الحامضية pH

تم قياس الدالة الحامضية للخرسانة المرجعية والخرسانة الحاوية على البوزولانا المعالجة بالماء لعمر ٩٠ يوما وذلك بتهيئة مسحوق من كل نوع من الخرسانة ويمرر من غربال ٦٠٠ مايكرون وهذا المسحوق يمزج مع ماء مقطر بنسبة ٣:١ على التوالي يوضع المزيج في دورق زجاجي مغلق ويحرك لمدة ١٠ دقائق ويترك لمدة ٤٨ ساعة وبعدها يتم تصفيته وتقاس الدالة بجهاز خاص لقياس الحامضية

٢-٣-٥ محتوى ايون الكلوريد في الخرسانة

تم تحديد محتوى ايون الكلوريد في الخرسانة المرجعية والخرسانة الحاوية على البوزولانا المعالجة بالماء لعمر ٩٠ يوما في دائرة بحوث المواد التابع لوزارة العلوم والتكنولوجيا بواسطة جهاز الكروماتوغرافيا الايوني تم تهيئة النماذج كما تم تفصيله سابقا بطريقة قياس الدالة الحامضية

٢-٣-٦ فحص جهد نصف الخلية

تم اجراء فحص جهد نصف الخلية للنماذج بموجب المواصفة الامريكية - ASTM C 876 99 على نماذج خرسانية موشورية بأبعاد (٧٥×٧٥ × ٢٥٠) ملم مسلحة بحديد تسليح مقاس ١٠ ملم وضع في مركز الموشور مع ترك غطاء خرساني من الأسفل اجري الفحص بشكل دوري وخلال فترات مناسبة من التعرض الى محلول كلوريد الصوديوم NaCl بتركيز ٤,٥٪

واستخدم لهذا الغرض قطب نحاس - كبريتات النحاس (Copper-copper sulphate electrode) كقطب مرجعي بموجب المواصفة الامريكية ASTM C876 والجدول رقم (٩) يبين العلاقة ما بين قيمة جهد نصف الخلية واحتمالية التآكل في حديد التسليح

جدول (٩): العلاقة ما بين جهد نصف الخلية واحتمالية التآكل حسب المواصفة الامريكية (ASTM C876)

جهد نصف الخلية (ملي فولتmV) *	الوصف
اقل من ٢٠٠	احتمالية قليلة للتآكل
ما بين -٢٠٠ الى -٣٥٠	احتمالية غير أكيدة للتآكل
أكثر من -٣٥٠	احتمالية عالية للتآكل
*القياس يتم باستخدام قطب مرجعي نوع النحاس –كبريتات النحاس	

٢-٣-٧ تيار التآكل

تم تحديد تيار التآكل بطريقة منحني تافل (Tafel plot) باستخدام جهاز استقطاب مبرمج من نوع Mlab 200 الماني المنشأ شكل رقم (٣) لحديد تسليح الخرسانة ذات الابعاد (٧٥×٧٥ ×٢٥٠) ملم والمعرضة الى محلول كلوريد الصوديوم NaCl بتركيز٤٥ % واستخدم لهذا الغرض قطب نحاس- كبريتات النحاس كقطب مرجعي وقطب البلاتينيوم كقطب مساعد بينما القطب العامل هو حديد التسليح المغمور بالنماذج الخرسانية يتم برمجة الجهاز لاستقطاب الجهد الكهربائي للحديد لغاية ٢٥٠mV من قيمة جهد الخلية المفتوح (OCP) لكلا الاتجاهين (الكاثودي والآنودي) وترسم العلاقة ما بين التيار والفولتية ثم تحسب شدة تيار التآكل (I_{corr}) بقسمة تيار التآكل(i_{corr}) على المساحة السطحية لحديد التسليح المغمور في المحلول والجدول رقم (١٠) يبين العلاقة ما بين قيمة تيار التآكل ومعدل سرعة تآكل حديد التسليح[١٩] يمكن حساب معدل التآكل باستخدام المعادلة المشتقة من قانون فراداي:

$$Corrosion\ rate\ (\mu m/y)\ = (Icorr * a)/(n\ F\ D)$$

حيث: معدل التآكل يعبر عنه (مايكرومتر لكل سنة)

كثافة تيار التآكل I_{corr} ($\mu A/cm^2$) الناتج عن قسمة تيار التآكل i_{corr} على مساحة الحديد المعرض

a: الوزن الذري للحديد ٥٥٨٤

F: ثابت فراداي

n: عدد مكافئ التوازن للحديد ويساوي ٢

d: كثافة الحديد [٢٠]

وبعد التعويض ممكن اختصار المعادلة الى:

$$Corrosion\ rate\ (\mu m/y)\ = \alpha\ * Icorr$$

α = ١١,٥٩ لحديد التسليح conventional reinforcement

شكل رقم (٣): جهاز قياس تيار التآكل لحديد التسليح

جدول (١٠) : العلاقة ما بين كثافة تيار التآكل مع سرعة التآكل [١٩]

كثافة تيار التآكل ($\mu A/cm^2$)	سرعة التآكل
أقل من ٠,١	غير ملحوظة
ما بين ٠,١-٠,٥	قليلة
ما بين ٠,٥ -١	متوسطة
أكثر من ١	عالية

٢-٤ النتائج والمناقشة

٢-٤-١ فحص الانضغاط

يبين الجدول رقم (١١) نتائج فحص مقاومة الانضغاط للخلطات الخرسانية ويلاحظ ان الخلطة المرجعية حققت مقاومة ٤٨ نت/مم^2 بعمر ٢٨ يوما وان تعويض الميتاكاؤولين بنسبة ١٢٥٪ من وزن السمنت أدى الى تقليل مقاومة الانضغاط بنسبة ٢٠٪ عن الخلطة المرجعية ولكن بعد ٩٠ يوما تقاربت نتائج الانضغاط فيما بينهما أما نسبة تعويض الميتاكاؤولين بنسبة ٢٠٪ من وزن السمنت حققت نسبة زيادة بالمقاومة مقدارها ٨٪ بعمر ٩٠ يوما عن الخلطة المرجعية حيث ان فاعلية المواد البوزولانية تعتمد على تفاعلها مع نواتج تفاعل السمنت وخاصة هيدروكسيد الكالسيوم لتنتج نواتج سمنتيه تزيد من مقاومة الخرسانة ويلاحظ ان فاعلية غبار السيليكا كانت أفضل من الميتاكاؤولين لغاية ٢٨ يوما واقتربت نتائج مقاومة الانضغاط للخرسانة الحاوية على غبار السيليكا والميتاكاؤولين عند عمر ٩٠ يوما وهذا يدل على كفاءة الميتاكاؤولين المحضرة محليا وامكانية منافستها للبوزولانا المستوردة.

جدول (١١): نتائج فحص مقاومة الانضغاط

العمر	مقاومة الانضغاط نيوتن/ملم^2 للخلطات			
	الخلطة المرجعية	مك١٢٥	مك٢٠	س١٢٥
٧ ايام	٣٥,٤	٣٢,٦	٣١,٥	٣٣,٨
٢٨ يوم	٤٨	٣٨	٤٤	٥٠,٨
٩٠ يوم	٥٥,٣	٥٥,٦	٦٠	٦٤,٨

٢-٤-٢ فحص الامتصاص السطحي

يبين الجدول رقم (١٢) نتائج فحص الامتصاص السطحي تعتبر الخرسانة المرجعية والخرسانة الحاوية على الميتاكاؤولين بنسبة تعويض ١٢٥٪ من وزن السمنت خرسانة متوسطة النفاذية إذا ما قورنت مع الحدود المثالية للامتصاص السطحي المبينة في جدول رقم (١٤) أما الخرسانة الحاوية على الميتاكاؤولين بنسبة تعويض ٢٠٪ والخرسانة الحاوية على غبار السيليكا بنسبة تعويض ١٢٥٪ فتعتبر خرسانة قليلة النفاذية.

جدول (١٢): نتائج فحص الامتصاص السطحي

الخلطة	قراءات الامتصاص السطحي ملليتر/م٢/ثانية بعمر ٢٨ يوم			
	١٠ دقيقة	٣٠ دقيقة	٦٠ دقيقة	١٢٠ دقيقة
الخلطة المرجعية	٠,٤١٥	٠,٢٩٣	٠,٢٠٨	٠,١٤٦
مك١٢,٥	٠,٣٨٣	٠,٢٧٧	٠,١٧	٠,١١١
مك٢٠	٠,٣٤٣	٠,١٦٧	٠,١٢٦	٠,٠٦٨
س١٢,٥	٠,٢٥٥	٠,١٢٨	٠,٠٧٣	٠,٠٤٨

٢-٤-٣ فحص النفاذية

جدول (١٣) يبين نتائج فحص النفاذية للنماذج الخرسانية بأبعاد (١٥*١٥*١٥) سم ولعمر ٢٨ و٩٠ يوما يلاحظ عدم وجود اختلاف كبير في مسافة اختراق الماء للخرسانة المرجعية وتلك الحاوية على البوزولانا حيث ان هذا الفحص يتم بتسليط ضغط ماء يتجاوز ٥ بار لمدة ٧٢ ساعة وهذا الضغط العالي قادر على اختراق المسامات الشعرية للخرسانة لذا وللحصول على خرسانة ذات نفاذية قليلة يتوجب تقليل نسبة الماء الى السمنت بنسبة عالية وذلك باستخدام المضافات المقللة للماء بشكل متفوق superplasticizer واستخدام مواد بوزولانية لضمان الحصول على خرسانة كتيمة بالإضافة الى استعمال مواد مانعة للرطوبة [٣] .

جدول (١٣): نتائج فحص النفاذية

العمر	ارتفاع الماء النافذ(سم)			
	الخلطة المرجعية	مك١٢٥	مك٢٠	س٢٥
٢٨ يوم	٧	٦	٧	٧
٩٠ يوم	٦	٥	٥	٥

٢-٤-٤ فحص الدالة الحامضية ومحتوى الكلوريد

يبين الجدول رقم (١٤) نتائج فحص الدالة الحامضية ومحتوى الكلوراید لأنواع الخرسانة بعمر ٩٠ يوما من المعالجة بالماء ويتبين ان المواد البوزولانية على الرغم من تفاعلها مع هيدروكسيد الكالسيوم الا انها لم تقلل قاعدية الخرسانة بسبب محتوى السمنت العالي ويلاحظ كذلك ان قدرة الميتاكاؤولين على الارتباط مع ايون الكلوريد تزداد بزيادة محتواه في الخلطة الخرسانية بسبب زيادة محتوى ألالومينا فللالومينا فاعلية في الارتباط مع أيون الكلوريد في المرحلة المبكرة ويتوجب توفيره كفاية للارتباط مع ايونات الكلوريد المحتملة الدخول للخرسانة[٢١]ان محتوى المركب C_3A في السمنت البورتلاندي الاعتيادي تتراوح ما بين ٧ الى ١٢٪ في حين ان السمنت المقاوم للكبريتات يحتوي على أقل من ٣,٥٪ وبهذا يكون أقل فاعلية في الارتباط مع ايون الكلوريد[٢١] ومن هنا تأتي أهمية الميتاكاؤولين بسبب محتواها العالي من الالومينا مقارنة بغبار السليكا على الرغم من ان فاعلية المواد البوزولانية تتضمن كذلك تطوير البنية المجهرية للخرسانة وتقليل نفاذيتها واعاقة دخول العناصر المؤدية للتآكل.

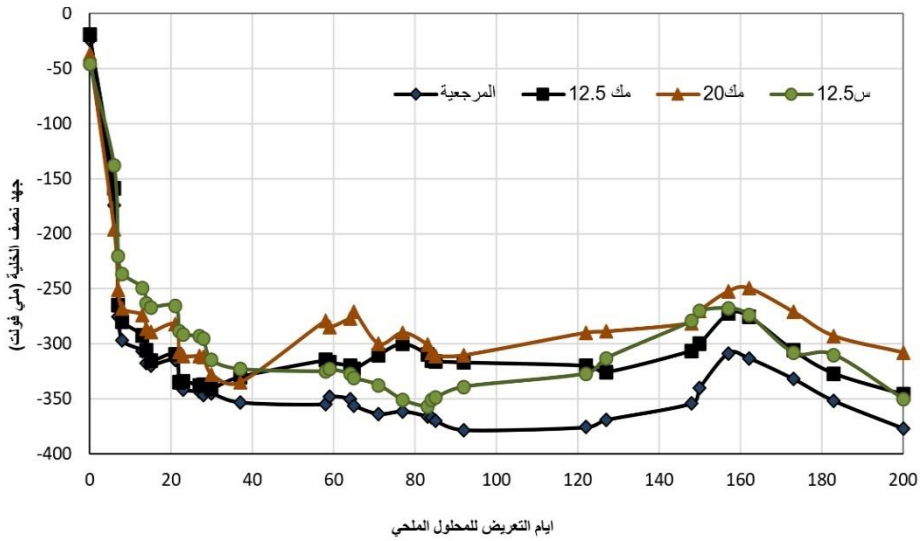
جدول (١٤) : نتائج فحص الدالة الحامضية ومحتوى الكلوريد في الخرسانة

الفحص	الخلطات الخرسانية			
	الخلطة المرجعية	مك١٢٥	مك٢٠	س١٢٥
الدالة الحامضية Ph	١١,٥	١١,٤	١١,١	١١,٥
محتوى الكلوريد (Cl^-)%	٠,٠٠٣٣	٠,٠٠٣	٠,٠٠١٢	٠,٠٠٢٨

٢-٤-٥ فحص جهد نصف الخلية

يبين الشكل رقم (٧) جهد نصف الخلية للحديد المغمور في الخرسانة المرجعية والخرسانة الحاوية على المواد البوزولانية يلاحظ ان جهد نصف الخلية للحديد المغمور في الخرسانة المرجعية قد تجاوز (-٣٥٠ ملي فولت) المحددة في المواصفة الامريكية ASTM C678 بعد حوالي ٦٠ يوما من التعرض للمحلول الملحي مشيرا الى احتمالية حدوث التآكل ابدى حديد التسليح المغمور في الخرسانة الحاوية على المواد البوزولانية مقاومة للتآكل لغاية ٢٠٠ يوما من التعريض لمحلول كلوريد الكالسيوم بتركيز ٤٥٪كما تشير نتائج الفحص الى ان مادة الميتاكاؤولين المعوضة بنسبة ٢٠٪ من وزن السمنت توفر حماية أفضل من نسبة

تعويض١٢٥٪ من كل من الميتاكاؤولين أو غبار السيليكا فكانت قيم جهد نصف الخلية لحديد التسليح في الخرسانة المرجعية والخرسانة الحاوية على الميتاكاؤولين بنسبة ١٢,٥ و٢٠٪



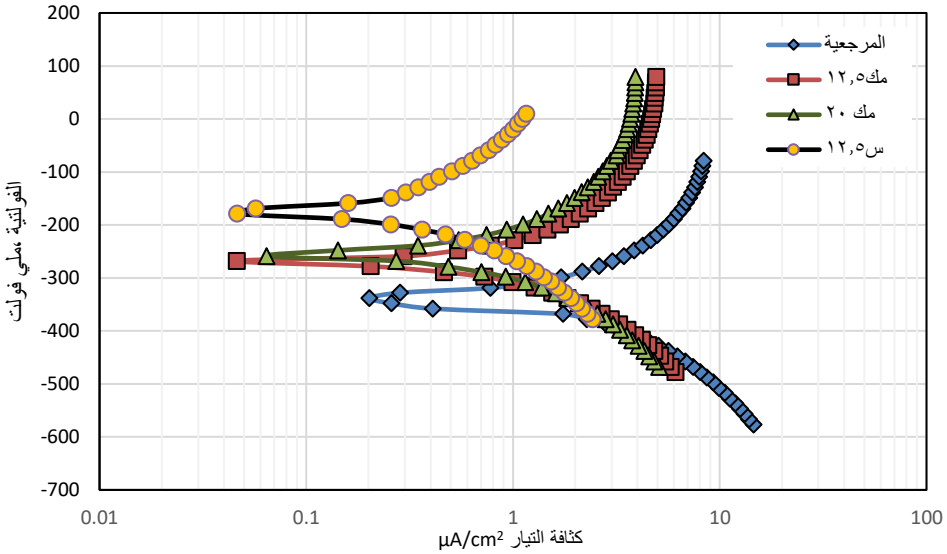
شكل (٧) : جهد نصف الخلية للحديد المغمور في الخرسانة المرجعية والخرسانة الحاوية على المواد البوزولانية

والحاوية على غبار السيليكا ١٢,٥٪ بعمر ٢٠٠ يوما (-٣٧٧.-٣٤٦.-٣٠٨.-٣٥٠) ملي فولت على التوالي. الملحق رقم ١حيث يلاحظ ان قيمة جهد نصف الخلية للخرسانة المرجعية تجاوزت الحرج المحدد بالمواصفة ASTMC687 والتي تحدده ب(-٣٥٠ ملي فولت) وهذا يعني حدوث احتمالية التآكل للحديد في الخرسانة غير الحاوية على البوزولانة يلاحظ كذلك تذبذب قراءات جهد نصف الخلية مع الزمن حيث تتاثر القراءات بعدة عوامل منها درجة الحرارة اثناء الفحص وظروف خلية الفحص وتعرض الحديد لفحص الاستقطاب وغيرها تؤدي الى تغير في قيم جهد نصف الخلية

٢-٤-٦ كثافة تيار التآكل

يبين الجدول (١٥) نتائج فحص الاستقطاب وهي كل من (جهد التآكل E_{corr} ويتم تعيينه من منحني تافل ويمثل نقطة تقاطع الميل الكاثودي مع الميل الانودي) و(كثافة تيار التآكل لحديد التسليح I_{corr} ويحسب من قسمة تيار التآكل على مساحة حديد التسليح المعرضة للمحلول)يلاحظ زيادة جهد التآكل مع زيادة مدة التعريض للمحلول الملحي وان حديد التسليح المغمور في الخرسانة الحاوية على الميتاكاؤولين بنسبة تعويض ٢٠٪ والحديد المغمور

الخرسانة الحاوية على غبار السيليكا أعطت أقل جهد تآكل وأقل كثافة تيار تآكل الشكل رقم (٨) يبين منحني تافل لحديد التسليح المغمور في أنواع الخرسانة المختلفة المحضرة في هذا البحث والمعرضة للمحلول الملحي لمدة ١٥٠ يوما ويلاحظ تفوق أداء الخرسانة الحاوية على البوزولانة مقارنة مع الخلطة المرجعية في حماية حديد التسليح فكانت قيم كثافة تيار تآكل حديد التسليح في الخرسانة المرجعية والخرسانة الحاوية على الميتاكاؤولين بنسبة ١٢٥ و٢٠٪ والحاوية على غبار السيليكا ١٢٥٪ بعمر ١٥٠ يوما (٠١٦,٠٣٩,٠٤٨,٠٩٣) مايكروامبير لكل سنتمتر مربع على التوالي. الملحق رقم ٢ وهذا يدل على ان استخدام المواد البوزولانية يقلل من تيار تآكل حديد لأكثر من ٥٠٪ عن الخرسانة المرجعية وذلك بسبب تفاعل المواد البوزولانية مع نواتج اماهة السمنت الذي يؤدي الى غلق مسامات الخرسانة وزيادة كتامتها وتقلل من نفوذ المحاليل الملحية والاوكسجين الى حديد التسليح.



شكل رقم (٨): منحني تافل لحساب تيار التآكل لحديد التسليح المغمور في أنواع الخرسانة والمعرضة للمحلول الملحي لمدة ١٥٠ يوما

جدول (١٥): نتائج فحص الاستقطاب

الخلطة	جهد التآكل E_{corr} (mV -)					كثافة تيار التآكل I_{corr} ($\mu A/cm^2$)					معدل التآكل مايكروم تر/سنة
	مدة التعريض للمحلول الملحي(يوم)					مدة التعريض للمحلول الملحي (يوم)					
	٢٨	٦٠	٩٠	١٢٠	١٥٠	٢٨	٦٠	٩٠	١٢٠	١٥٠	
الخلطة المرجعية	٢٨٥	٣١٤	٣١٩	٣٣٠	٣٣٤	٠,٦٤	٠,٨٨	٠,٧٧	٠,٨٧	٠,٩٣	١٠,٨
مك ١٢٥	٢١٤	٢٥١	٢٦١	٢٦٠	٢٦٧	٠,٣٢	٠,٣٧	٠,٤١	٠,٤١	٠,٤٨	٥,٦
مك٢٠	١٣٦	٢٤٥	٢٢٤	٢٣٦	٢٥٨	٠,٢٣	٠,٤٤	٠,٣٢	٠,٣٣	٠,٣٩	٤,٥
س١٢٥	١٢٩	٩٠	١٢١	١٣٠	١٦٤	٠,١٩	٠,١٦	٠,١٦	٠,١٧	٠,١٦	١,٨٦

٣-الاستنتاجات

١-ابدى حديد التسليح المغمور في الخرسانة الحاوية على المواد البوزولانية مقاومة للتآكل أفضل من الحديد المغمور في الخرسانة المرجعية كما تشير نتائج الفحوص الكهربائية الى ان مادة الميتاكاؤولين المعوضة بنسبة ٢٠٪ من وزن السمنت توفر حماية أفضل من نسبة تعويض١٢,٥٪ فكانت قيم كثافة تيار تآكل حديد التسليح في الخرسانة المرجعية والخرسانة الحاوية على الميتاكاؤولين بنسبة ١٢,٥ و٢٠٪ والحاوية على غبار السيليكا ١٢,٥٪ بعمر ١٥٠ يوما (٠,٠٩٣,٠,٤٨,٠,٣٩,٠,١٦) مايكروامبير لكل سنتمتر مربع على التوالي. وهذا يدل على ان استخدام المواد البوزولانية يقلل من كثافة تيار تآكل حديد التسليح لأكثر من ٥٠٪ عن الخرسانة المرجعية يلاحظ ان كثافة تيار تآكل حديد تسليح الخرسانة المرجعية يقع ضمن الاحتمالية المتوسطة حسب الحدود التي يحددها الكود الامريكي ACI 222R والتي تتراوح ما بين (٠,٥ الى ٠,١). اما كثافة تيار تآكل حديد تسليح الخرسانة الحاوية على المواد البوزولانية فيقع ضمن الاحتمالية القليلة التي تتراوح ما بين (٠,١-٠,٥)

٢-ان استخدام المواد البوزولانية (الميتاكاؤولين وغبار السليكا) أدى الى تقليل الامتصاص السطحي للخرسانة مقارنة بالخرسانة المرجعية. علما بان استخدامها بدون تقليل نسبة الماء الى السمنت لا يؤدي الى تقليل نفاذيتها لاختراق الماء تحت الضغط وهنا لابد من استخدام المضافات المقللة للماء للحصول على خرسانة عالية الأداء والتي يستوجب استخدامها في المنشآت المعرضة للمياه مثل ركائز الجسور المغمورة جزئيا بالماء أو الموانئ البحرية اما في المنشآت الخرسانية المعرضة للمحاليل الملحية بدون ضغط مياه عالي فيكون استخدام المواد البوزولانية مفيدا ويقلل تآكل حديد التسليح بشكل ملحوظ

٣-أثبتت مادة الميتاكاؤولين المحلية فعالية بوزولانية متفوقة مقارنة بمادة غبار السليكا المستوردة ويعتبر الكاؤولين الذي يستخدم لإنتاج الميتاكاؤولين من المواد المتوفرة بالعراق وبكميات كبيرة حسب مسوحات الشركة العامة للمسح الجيولوجي والتعدين

٤-ان الخلطة المرجعية حققت مقاومة ٤٨ نت/مم^2 بعمر ٢٨ يوما وان تعويض الميتاكاؤولين بنسبة ١٢,٥٪ من وزن السمنت أدى الى تقليل مقاومة الانضغاط بنسبة ٢٠٪ عن الخلطة المرجعية ولكن بعد ٩٠ يوما تقاربت نتائج الانضغاط فيما بينهما أما نسبة تعويض الميتاكاؤولين

بنسبة ٢٠٪ من وزن السمنت حققت نسبة زيادة بالمقاومة مقدارها ٨٪ بعمر ٩٠ يوما عن الخلطة المرجعية ويلاحظ ان فاعلية غبار السيليكا كانت افضل من الميتاكاؤولين لغاية ٢٨ يوما واقتربت نتائج مقاومة الانضغاط للخرسانة الحاوية على غبار السيليكا والميتاكاؤولين عند عمر ٩٠ يوما وهذا يدل على كفاءة الميتاكاؤولين المحضرة محليا وامكانية منافستها للبوزولانة المستوردة.

٤- التوصيات

تحدد المدونة العربية للخرسانة المسلحة (مدونة تصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة - ١٩٩٧) (الكودات العربية الموحدة لتصميم وتنفيذ المباني) النسبة المستخدمة للسمنت بمقدار ٤٠٠ كغم /م^3 لمقاس ركام ٢٠ ملم ونسبة ماء ٠,٤٢ للخرسانة المسلحة المعرضة للمياه الخارجية المالحة أثبتت فحوص جهد نصف الخلية وتيار التآكل عدم كفاية هذه المتطلبات لحماية حديد التسليح حيث كان تيار التآكل ضمن الاحتمالية المتوسطة التي يحددها الكود الأمريكي (ACI222R) لذا نوصي بتقليل نسبة الماء الى السمنت أو استخدام المواد البوزولانية كبديل جزئي من وزن السمنت بالنسب التي اثبتت فاعليتها مع محددات المقاومة ونسبة الماء الى السمنت المذكورة في المدونة أعلاه حيث يمكن ان توفر حماية جيدة لحديد التسليح.

المصادر

[١]ACI Committee 222R (2001) 'Corrosion of Metals in Concrete', Manual of Concrete Practice.

[٢] Civjan, S. A., Lafave, J. M., Lovett, D., Sund, D. J. and Trybulski, J. (2003) 'Performance Evaluation and Economic Analysis of Combinations of Durability Enhancing Admixtures (Mineral and Chemical) in Structural Concrete for the Northeast USA', Prepared for the New England Transportation Consortium, New England, USA.

[٣] امام, محمود. (٢٠٠٢) "الخرسانة", جامعة المنصورة، مصر.

[٤] Kosmatka, S., Kerkhoff, B., and Panarese, W. (2003) 'Design and control of concrete mixtures', 4th ed., Portland Cement Association.

[٥] Bertolini, L., Elsener, B. P., Redaelli, E., Polder, R. (2013) 'Corrosion of Steel in Concrete', Willey-Vch Verlag GMBH and Co. KgaA.

[٦] Kurtis, K. and Monteiro, P. (2001) 'Analysis of Durability of Advanced Cementitious Materials for Rigid Pavement Construction in California', California department of transportation, Report No. FHWA/CA/OR-99-02.

[٧] Hansson, C. (1984) 'Comments on the Electrochemical Measurements of the Rate of Corrosion of Steel in Concrete', Cement and Concrete Research, vol. 14, pp. 574-584.

[٨] Boddy, A., Hooton, R., and Gruber, K. (2001) 'Long-term testing of the chloride penetration resistance of concrete containing high reactivity metakaolin', Cement and Concrete Research, vol. 31, pp. 759-765.

[٩] Wafaa, A., Ibrahim, M., Amal, S., and Ghalia, A. (2013) 'Corrosion Behavior of Reinforcing Steel in Cement Partially Replaced with Metakolin in 3.5% NaCl and 5% MgSO4 Solutions', International Journal of Metallurgical & Materials, Science and Engineering, 3(5), pp. 1-8. http://wwwtjprcorg

[١٠] Vedalakshmi, R., Rajagopal, K., and Palaniswamy, N. (2008) 'Long-term Corrosion Performance of Rebar Embedded in Blended Cement Concrete Teunder Macro-cell Corrosion Condition', Construction and Building Materials, vol. 22, pp.186-199.

[١١] Thoeny, Z. (2005) 'Mechanical Properties of Ultra-high Strength Concrete Incorporation High Reactivity Metakaoline Cement', M.Sc. Thesis, University of Technology, Iraq.

[١٢] Al-Ani, H. (2005) 'Fiber Reinforced High Performance Concrete Incorporating Calcined Clay Pozzolanic Cement', M.Sc. Thesis, University of Technology, Iraq.

[١٣] Samir, M. (2007) 'Effect of chloride ion source on corrosion of steel in concrete', M.Sc. Thesis, University of Technology, Iraq.

[١٤] Al-Hubboubi, S. (2010) 'Corrosion-Resistance Characteristics of Concrete Containing Furfural', Ph.D. Thesis, University of Baghdad, Iraq.

[١٥] Ahmad, H. (2010' "Effect of Different Types of Admixtures on the Properties of Self Compacting Concrete (SCC)', M.Sc. Thesis, University of Baghdad.

[١٦]الحبوبي، سهير كاظم., شاهر, حيدر عبد الكريم., محمد, رواء علي., فنجان, بثينة. (2013) "إنتاج خرسانة عالية المقاومة والديمومة باستخدام المواد المحلية"، دائرة بحوث البناء.

[١٧] (١٩٩٧) "كودة تصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة", الكودات العربية الموحدة لتصميم وتنفيذ المباني.

[١٨] (2002) "Guidebook on non-destructive Testing of Concrete Structures', International Atomic Energy Agency, Vienna.

[١٩] ACI Committee 222.2R, (2001) 'Corrosion of Prestressing Steels', ACI Committee.

[٢٠] Trejo, D., Halmen, C., and Reinschmidt, K. (2008) 'Corrosion Performance Tests for Reinforcing Steel in Concrete: Technical Report', Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration, Texas, U.S.A.

[٢١] Mark, G. (2002) 'Fundamentals of Durable Reinforced Concrete', Taylor and Francis group.

Building Research Journal
Volume 9 Number 1 2024

Protection of Steel Reinforcement from Corrosion in Concrete Containing Sulfate-Resistant Cement Mixed with Pozzolana

*[1]Suhair Kadhim Al-Hubboubi, [2]Tariq Salih Alatar, [1]Nedaa Taha Edan,
[1]Huda Hameed Nasir, [1]Buthaina Finjan Hadhud

[1] Structures Department, Building Research Directorate, Baghdad, Iraq.
[2] Civil Engineering Department, University of Technology, Baghdad, Iraq.

Abstract

The wide range of structural problems resulting from the corrosion of rebar in the structural sections make it one of the important problems facing various countries of the world. The research aims to test the adequacy of the requirements contained in the Arab Code for the design and implementation of reinforced concrete structures, with regard to the requirements of reinforced concrete exposed to ambient or harmful conditions or to sea water, , and these requirements include the minimum cement content and the maximum ratio of water to cement to ensure sustainability, as well as studying the effect of partial replacement of pozzolanic materials (metacholine. silica dust) of the weight of cement on increasing the protection of rebar from corrosion. Reference reinforced concrete was prepared with a cement content of 400 kg / m^3, a maximum size of aggregates of 20 mm and a water-to-cement ratio of 0.4, as well as other reinforced concrete mixtures were prepared with partial compensation of the weight of cement with pozolanic materials (metacholine, silica dust) and the effectiveness of all these mixtures was tested to resist the corrosion of rebar in the partially submerged concrete in NaCl sodium chloride solution at a concentration of 4.5%. It was found that the use of pozzolanic materials reduces the corrosion current of rebar by more than 50% rather than in reference concrete.

Keywords: Durability, Corrosion, Pozzolana, Silica Fume, Metakaolin.

*Corresponding author Suhair Kadhim Al-ubboubi
suhairkah@yahoo.com