بحث مفصل عن متانة الخرسانة
واسباب فشلها
والعوامل المؤدية الى تقليل عمرها

المهندس / هونه رحسين عبدالله Eng.hunar@gmail.com
كلية الهندسة/ جامعة تكريت / ١٩٩٦-١٩٩٧
قسم الهندسة المدنية

مقدمة

الخرسانة مادة تتكون من مواد طبيعية معظمها موجودة فى البيئة المحلية أو على مسافة قريبة منها وتتميز بقدرة عالية لتحمل الضغط ولكن العيب الأساسى فيها أن قدرتها على تحمل الشد ضعيفة . فإذا أضفنا إليها حديد التسليح يكون الناتج (الخرسانة المسلحة) . وهى تجمع مزايا الخرسانة والحديد مثل رخص الثمن (نسبياً) ،مقاومة العوامل الجوية والحريق ، مقاومة عالية للضغط بالإضافة إلى القدرة على أخذ أشكال عديدة.

المتانة هى تحمل الخرسانة للظروف التى صُممت من أجلها وتعمل فى محيطها فترة طويلة من الزمن (العمر الإفتراضى) دون حدوث تلف أو تفتت بها. وبمعنى آخر فإن المتانة هى مقاومة الخرسانة للتلفDeterioration سواءاً التلف الناتجمن عوامل خارجية أو من عوامل داخلية. العوامل الداخلية تشمل حدوث تفاعلات ضارة بين مواد الخرسانة وحدوث تغيرات حجمية بها وكذلك نفاذ السوائل فيها. أما العوامل الخارجية فتشمل ظروف التشغيل والتحميل وتأثير الجو المحيط بالمنشأ.

مكونات الخرسانة

تتكون الخرسانة من حبيبات صخرية (الركام) متماسكة مع بعضها البعض بمادة لاحمة هى عجينة الأسمنت .

١- الركام (Aggregates)

هى المادة المالئة الخاملة للخرسانة وهى رخيصة نسبياً وتكون بصفة عامة متدرجة وتشغل ٧٥% من الكتلة الخرسانية ويجب أن تكون حبيبات الركام صلبة وقوية الاحتمال ونظيفة وخالية من المغلقات الملتصقة وتكون المقاسات المختلفة للحبيبات موزعة توزيعا منتظماً فى الخليط الشامل وكذلك يجب ألا تكون ذات تفاعل ضار مع الخرسانة أو الحديد ، ومن أنواعها الرمل والحصو والحجر المكسر.

وينقسم الركام إلى :-

أ- الركام الصغير Fine Aggregates

وهو مجموعة الحبيبات التى يمر معظمها (٩٥ – ١٠٠%) من المنخل القياسى ٤,٧٦ مللى ٣/١٦ .

ب- الركام الكبير Coarse Aggregates

وهو مجموعة الحبيبات التى يحتجز معظمهما (٩٥-١٠٠%) من المنخل القياسى ٤,٧٦ مللى ٣/١٦ .

٢- الأسمنت Cement

هو المادة اللاصقة بين حبيبات الركام ويصنع من مواد كلسية (حجر جيرى) ومواد طينية بعد خلطها جيدا، وبحرقها نحصل على كرات الكلنكر، ثم يطحن المتحصل عليه طحنا جيدا، وبإضافة بعض المواد أثناء الطحن يمكن الحصول على عديد من أنواع الأسمنت :-

ومن أنواع الأسمنت :-

الأسمنت البورتلاندى العادى
الأسمنت البورتلاندى سريع التصلد
الأسمنت البورتلاندى منخفض الحرارة
الأسمنت الالومينى
الأسمنت البورتلاندى المقاوم الكبريتات
الأسمنت البورتلاندى الأبيض
الأسمنت البورتلاندى الحديدى (خبث الأفران)

٣- ماء الخلط :

وظيفة ماء الخلط :-

١- اماهة hydration الأسمنت لتكوين عجينة الأسمنت التى تعمل على تماسك الحبيبات (الركام) وذلك بعد أن تتصلب ابتدائياً (حوالى ٣ ساعات) ونهائياً (حوالى ٨ ساعات) ثم تتصلد.
٢- يقوم بزيادة قابليته التشغيل للخرسانة Workability لكن الماء يتبخر بعد ذلك ويترك فراغات لما يقلل من مقاومة الخرسانة .

وعموماً أى مياه صالحة للشرب باستثناء الاشتراطات البكتريولوجية يمكن استخدامها فى صناعة الخرسانة وتقاس المياه كنسبة من الأسمنت W/C Water to Cement ratio وغالبا تكون فى حدود ٠,٤ – ٠,٦ .

أسباب تلف الخرسانة

يوجد أسباب عديدة تؤدى إلى تلف الخرسانةDeterioration يمكن تصنيفها إلى المجموعات الآتية:

أ- اسباب داخلية

وهى المتعلقة بمكونات الخرسانة أو وجود مواد ملوثة بها مثل الطين أو السيليكا النشطة (فى بعض أنواع الركام) أو وجود أملاح ضارة بهذه المكونات. كل ذلك يؤدى الى تفاعلات ضارة تعمل على تلف الخرسانة. والمكونات الرئيسية للخرسانة هى:

١- الأسمنت
٢- الركام
٣- ماء الخلط
٤- حديد التسليح
٥- الإضافات المعدنية والكيميائية

ب- اسباب خارجية وهى الناتجة من الوسط المحيط بالخرسانة

١- مهاجمة الكيماويات مثل الكبريتات والكلوريدات للخرسانة
٢- ماء البحر
٣- ماء المجارى
٤- المخلفات الصناعية

ج- اسباب اخرى تؤثر على معدل تلف الخرسانة

١- حركة المياه الجوفية
٢- درجة حرارة المياه الجوفية
٣- تذبذب منسوب المياه الجوفية (دورات بلل وجفاف)
٤- التبخر خلال سطح الخرسانة
٥- التأكسد والكربنة
٦- أسباب بيولوجية

مقاومة الخرسانة للتلف

يمكن تصنيف أهم المقاومات التى توصف الخرسانة بأنها تتحملها مع الزمن كما يلى:

١- المقاومة للنفاذية والإمتصاص.
٢- المقاومة لصدأ الحديد.
٣- المقاومة لتأثير الكيماويات.
٤- المقاومة لماء البحر.
٥- المقاومة للعوامل الجوية.
٦- المقاومة للحريق.
٧- المقاومة لماء المجارى.
٨- المقاومة للتآكل.

المسامية و النفاذية والإمتصاص

ينبغى عدم الخلط بين الإمتصاصAbsorption والنفاذيةPermeability والمسامية Porosity

فالإمتصاص هو قدرة الخرسانة على سحب الماء داخل فجواتها وهو غير مرتبط بالنفاذية ويؤدى الإمتصاص إلى انتفاخ الخرسانة كما يؤدى إلى تفتتها عند تعرضها لدورات التجمد والذوبان وهى مشبعة بالماء.

أما النفاذية فهى الخاصية التى بواسطتها يمكن تسرب أى سائل خلال الخرسانة. وهذه السوائل تقلل من عمر الخرسانة لأن وصول الرطوبة إلى حديد التسليح يؤدى إلى الصدأ ودخول الأحماض والأملاح يؤدى إلى تدهور الخرسانة. كما أن نفاذية الخرسانة قد تعنى فى بعض الأحوال عدم أداء المنشأ لوظيفته آما فى حالة الخزانات المحتوية على سوائل أو حوائط السراديب والمنشآت تحت الأرض ففى مثل هذه المنشآت تصبح عدم نفاذية الخرسانة خاصية مطلوبة وهامة كمقاومتها للأحمال وأكثر.

بينما نجد أن المسامية هى وجود مسام أو فجوات داخل المادة الصلبة وقد تكون هذه المسامات متصلة عن طريق أنابيب دقيقة أو مسارات شعرية أو قد تكون هذه المسامات منفصلة عن بعضها.

إن التركيب الداخلى لعجينة الأسمنت يحتوى على مسامات دقيقة نتيجة التفاعلات الكيميائية التى تصاحب إماهة الأسمنت والماء. إذن فالخرسانة بطبيعتها مادة مسامية ولكى تصبح الخرسانة منفذة للسوائل أو الهواء فلابد من إتصال هذه المسامات على هيئة أنابيب دقيقة متقاطعة. وعلى ذلك فالمسامات المحدودة العدد المعزولة عن بعضها البعض لن تؤدى إلى نفاذ الماء أو الهواء .

انواع المسامات الداخلية

يوجد ثلاثة أنواع من المسامات يمكن تمييزها كما يلى:

أ - المسامات الهوائية :

ومنها الصغير جداً وهو عادة ما يتم تكوينه صناعياً داخل الخرسانة عن طريق إضافات الهواء المحبوس لزيادة القابلية للتشغيل وتحسين المقاومة للصقيع ومنها المسامات الهوائية الكبيرة غير المنتظمة وهى تنشأ عادة عن عيوب الصب والرص للخلطة الخرسانية والمسامات الهوائية يتراوح قطرها من ٠,٠١ إلى ٠,٢ ملم.

ب - المسامات الجيلاتينية Gel Pores:

وهى أدق وأصغر أنواع المسامات على الإطلاق حيث يبلغ قطرها من ٠,٥×١٠ -٦ ملم إلى ١٠×١٠ -٦ ملم وتتكون بعد عملية الإماهة حيث تتصلد العجينة الأسمنتية مكونة جسماً صلباً متجانساً. هذا الجسم الصلب به نسبة عالية من الفراغات الداخلية (مسامات جيلاتينية).

ج - المسامات الشعرية Capillary Pores:

بعد خلط الأسمنت مع الماء مباشرة يحدث تكتل لحبيبات الأسمنت والماء ويسمى الماء الموجود فى الفراغات داخل هذا التكتل بالماء الشعرىCapillary Water حتى يحدث له تفاعل كامل مع الأسمنت ويترك مكانه خالياً مكوناًالمسامات الشعرية التى تعتبر أكثر أنواع المسامات والتى تحدد درجة المسامية الكلية للخرسانة. والمسامات الشعرية ذات قطر يتراوح من ١٠×١٠ -٦ ملم الى ١٠×١٠ -٣ ملم (أى أنها وسط بين المسامات الجيلاتينية والمسامات الهوائية).

وعموماً فإن الخرسانة بطبيعتها تعتبر مادة مسامية وإتصال الفجوات الداخلية هو الذى يؤدى إلى زيادة النفاذية. ولزيادة تحمل الخرسانة مع الزمن لابد من تقليل النفاذية. وتقليل النفاذية ممكن عن طريق تخفيض نسبة الماء الى الأسمنت وإستخدام انواع أسمنت ناعمة وركام صلد غيرمنفذ ، كما أن تفادى الإنفصال الحبيبى عند الصب وكذلك الرص الجيد والمعالجة المناسبة تقلل من نفاذية الخرسانة. وكما وإن إستخدام بعض المواد مثل غبار السليكا يقلل من نفاذية الخرسانة .

تاثير المنفذية على الخرسانة

١- إن سريان الماء والهواء داخل الخرسانة يؤدى إلى صدأ حديد التسليح وتآكله.

٢- فى الأجواء الباردة يتجمد الماء داخل الفراغات مسبباً تمدد ينشأ عنه إجهادات تؤثر على متانة الخرسانة.

٣- قد يحمل الماء بعض الأملاح معه داخل جسم الخرسانة فتتفاعل كيميائياً أو تتحول إلى بلورات مما يسبب إجهادات داخلية تضعف الخرسانة.

٤- قد يحمل الماء عند خروجه من الخرسانة بعض الأملاح أو المركبات المكونة للخرسانة مما يسبب زيادة الفراغات. كما أن هذا الماء يتبخر تاركاً الأملاح على السطح الخارجى للخرسانة مما يضر بشكل المنشأ.

العوامل المؤثرة على المنفذية والمسامية

١- نسبة الماء إلى الأسمنت (م/س) : حيث تزداد المنفذية بزيادة نسبة م/س فزيادة كمية الماء تؤدى إلى وجود فراغات بالخرسانة عند جفافها. كذلك فى حالة زيادة الماءفإن القوام يصير مبتلاً مما يسمح بهبوط حبيبات الركام الثقيلة إلى الأسفل ثم يخرج الماء إلى السطح خلال ممرات شعرية تظل موجودة بعد جفاف الخرسانة.

٢- الركام : يجب أن يكون الركام من النوع المصمت السليم غير المسامى كما يجب أن يكون متدرجا ويجب أن يكون من النوع الذى لا يتفاعل قلوياً مع الأسمنت حتى تتلافى وجود الفراغات الناتجة من هذا التفاعل.

٣- الإضافات : يمكن تحسين مقاومة نفاذ الماء بإستخدام الإضافات للأغراض الآتية:

أ - لتقليل نسبة م/س بحيث تقل كمية الماء فى الخلطة.

ب- لتكوين طبقة محكمة تقوم بسد المسام فى الخرسانة.

ج- لتعديل تكون بلورات هيدرات سيليكات الكالسيوم CSH أثناء عملية الإماهة وبالتالى تعديل التكوين الداخلى للمسام الجيلاتينية.

٤- الخلط والرص : إنتظام ودقة عمليتى الخلط والرص تحسن من منفذية الخرسانة للماء.

٥- معالجة الخرسانة : إن المعالجة السيئة للخرسانة تؤدى إلى زيادة التبخر وبالتالى زيادة المسامات الشعرية والهوائية التى يتبخر منها الماء كما قد تؤدى الى حدوث شروخ الإنكماش اللدن التى تزيد المسامية والنفاذية.

٦- إستعمال مواد بوزولانية Pozzolanic Materials : وهى المواد التى تتفاعل مع هيدروكسيد الكالسيوم الحر الناتج عن تفاعل الأسمنت مع الماء مكونة مركبات غير قابلة للذوبان مثل سيليكات وألومنيات الكالسيوم والتى تعمل على سد الفجوات الداخلية والمسام الشعرية. ومن أمثلة المواد البوزولانية مادة غبار السليكا Silica Fume وهى تتكون من حبيبات دقيقة جداً مساحتها السطحية حوالى أربعة أمثال المساحة السطحية للأسمنت (٢٠,٠٠٠ سم ٢/غم) وهى ناتج ثانوى Byproduet فى صناعة سبائك السيليكون والفيروسيليكون وتتفاعل مادة غبار السليكا مع هيدروكسيد الكالسيوم مكونة سيليكات الكالسيوم المماهة والتى لا تذوب فتؤدى إلى تقليل الفجوات الداخلية والمسامات الشعريةومن المواد الأخرى مسحوق الرماد المتطايرFly Ash وكذلك خبث الأفران المطحون Blast Furnace Slag.

٧- حرارة الإماهة : قد تؤدى الحرارة المصاحبة لعملية الإماهة إلى حدوث شروخ ميكروسكوبية فى عجينة الأسمنت مما يؤدى إلى اتصال الفجوات الداخلية وزيادة النفاذية.

الاحتياطات والتوصيات لإنتاج خرسانة غير منفذة

١- يجب أن لا تكون الخلطة فقيرة الأسمنت.
٢- يجب أن تكون الخلطة لدنة بالدرجة الكافية لتحقيق الكثافة المطلوبة .
٣- إستعمال نسبة قليلة من م/س بقدر الإمكان وتعويض النقص فى القابلية للتشغيل بإستخدام إضافات مناسبة .
٤- يجب أن يكون الركام جيد التدرج حتى نحصل على أقل نسبة فراغات ممكنة.
٥- إستخدام مواد بوزولانية إذا أمكن ذلك.
٦- يجب العناية بعمليتى الصب والرص لتجنب تكون جيوب هوائية ولإخراج فقاعات الهواء مع مراعاة عدم حدوث إنفصال حبيبىgranular segregation .

طرق حماية الأسطح الخرسانية لجعلها غير منفذة

تنقسم هذه الطرق إلى قسمين رئيسين :
أ- إضافة مادة مانعة لنفاذ الماء إلى مكونات الخرسانة أثناء إعداد الخلطة وقد تكون هذه المادة مسحوقا ناعما يقوم بملء الفراغات الموجودة فى الخرسانة أو مادة تعمل على سرعة تكوين الجيلاتين لتتصلب الخرسانة سريعاً أو مركباً طارداً للماء للعمل على عدم سريان الماء بواسطة الخاصة الشعرية.
ب- المعاملة السطحية للخرسانة والتى يمكن أن تأخذ إحدى الصور الآتية:
١ - تشريب السطح بمواد طاردة للماء وملء الفجوات بطبقات حماية سطحية.
٢- عمل طبقات حماية سطحية مثل:
- البياض بمواد ذات سمك ٠,٥ ملم إلى ٥ ملم.
- التغطية بالمواد المطاطة.
- الأغشية البوليمرية الجاهزة تثبت بالخرسانة.
- إستخدام ألواح من الحديد الذى لا يصدأ أو ألواح من البلاستيك.
- التبليط ببلاطات مقاومة للمواد الضارة بالخرسانة مثل السيراميك أو الخزف.

صدأ الحديد

إن صدأ حديد التسليح هو أكثر مشاكل المنشآت انتشاراً ويرجع معظم التصدع فى المنشآت الخرسانية ونقص عمرها الإفتراضى لصدأ الحديد. وتعتبر الخرسانة المسلحة من المواد التى تتحمل مع الزمن وتعيش طويلاً ويفضلها المصممون عن كثير من أنواع المنشآت ولايقلل من عمرها وتحملها إلا صدأ الحديد. وقد يكون الصدأ بسيطاً ويظهر فى صورة تنميل خفيف - شروخ رفيعة- عند قضبان التسليح أو بقع صدأ وقد يزيد فيؤدى إلى تساقط الخرسانة المكونة للغطاء الخرسانىSpalling وقد يصل الصدأ إلى حدوث إنهيار للعضو الخرسانى بأكمله.
وخطورة صدأ الحديد أنه يبدأ ويستمر لمدة طويلة بدون ظهور أعراض وذلك لأن التلف المصاحب لصدأ الحديد بطئ وقد يستمر سنين وخطورته أيضا أنه طالما بدأ فسيستمر حتى ولو أزيل مصدر الرطوبة ما لم يزال الحديد الصدئ والخرسانة المعيبة وتستبدل بخرسانة سليمة.
وأى إجراء يتبع لإصلاح الوضع التالف لخرسانة أصابها الصدأ يعتمد كلية على الفهم السليم لأسباب حدوث الصدأ ووسائل السيطرة عليه ومنعه من الإستمرار. والحقيقة أن الرطوبة والأكسجين هماوقود عملية الصدأ الذى يبدأ حينما تفقد الحماية التى توفرها الخرسانة للقضبان نتيجة أسباب عديدة مثل زيادة نسبة الكلوريدات بالخلطة أو التحول الكربونى للخرسانة الخارجية أو حدوث شروخ نتيجة أسباب أخرى غير الصدأ مما يسهل وصول الرطوبة إلى القضبان ويبدأ الصدأ.

كيف تحمي الخرسانة الحديد من الصدأ؟

الحماية التى توفرها الخرسانة للحديد ضد الصدأ ذات شقين:
أ- تكون طبقة حماية سلبية (Passive Protection Layer) على سطح قضبان الحديد وترجع هذه الحماية إلى أن الخرسانة المحيطة بالحديد قاعدية ذات أس هيدروجينى(pH) يتراوح من ١٢ إلى ١٤ وعند هذه القيمة للأس الهيدروجينى فإن التفاعلات الكيميائية التى تحدث على سطح حديد التسليح تؤدى إلى ظروف تصبح فيها التفاعلات الكهروكيميائية المؤدية إلى الصدأ غير ممكنة - كما تؤدى هذه التفاعلات إلى تكوين طبقة رقيقة جداً من نواتج الصدأ - مثل أكسيد الحديد Fe2 O3- فتلتصق بسطح الحديد وتمنع حدوث صدأ الحديد - وبذلك تصبح قاعدية الخرسانة المحيطة بحديد التسليح هى سبب حماية الحديد ، وعملياً فإن هذه الحماية فعالة لمدة طويلة إلا إذا فُقدت هذه القاعدية نتيجة أملاح أو أحماض تتغلغل فى الخرسانة أو نتيجة للتحول الكربونى للخرسانة السطحية.
ب - عمل حاجز يمنع وصول الرطوبة والأملاح فى الجو المحيط إلى الحديد وهذا الحاجز هو الغطاء الخرسانى للحديد Cover .

اسباب حدوث الصدأ

عندما يقل الغطاء الخرسانى عن حد معين يصبح الحديد معرضاً للعوامل الجوية ويمكن أن يبدأ الصدأ فى وجود الرطوبة والأكسجين. وحتى مع وجود غطاء خرسانى كاف فإن الصدأ يمكن أن يبدأ عندما تقل قاعديةالخرسانة المحيطة بالحديد إلى الحد الذى ينخفض فيه الأس الهيدروجينى إلى ١٠ أو أقل ، ففى هذه الحالة تصبح الطبقة الحامية السلبية غير متزنة وتنكسرمما يجعل التيار الكهربائى يسرى فى الحديد ومن ثَمَ يبدأ الصدأ. وفقد القاعدية يحدث نتيجة لعامل أو أكثر من العوامل الآتية:

١ - التحول الكربونى للخرسانة فى الغطاء الخرسانىCarbonation.

٢- أبخرة أو محاليل حامضية يتعرض لها العضو.

٣ - تغلغل الكلوريدات فى الخرسانة من المياه المحيطة أو وجودها فى الخلطة الخرسانية أصلاً.

٤- وجود شروخ سطحية -لأسباب أخرى غير الصدأ- بعمق يصل إلى الحديد وخاصة إذا كانت الشروخ موازية لحديد التسليح.

١ - التحول الكربونى للخرسانة Carbonation

تفقد خرسانة الغطاء الخارجى قاعديتها نتيجة عملية تسمى التحول الكربونى للخرسانة وهى تفاعل ثانى أكسيد الكربون الموجود بالجو مع المواد القاعدية الموجودة بالخرسانة - هيدروكسيدالكالسيوم - محولاً إياها إلى كربونات فى وجود الرطوبة :

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \xrightarrow{\text{(water)}} CaCO_3 + H_2O$$

وكنتيجة لذلك تقل قاعدية الخرسانة إلى أقل من المستوى المطلوب لتوفير الحماية السلبية للحديد (أقل من ١٠). ونظراً لأن التحول الكربونى ينتج عن التفاعل مع ثانى أكسيد الكربون الموجود بالهواء فهو يبدأ من السطح ويمتد إلى الداخل. والخرسانة الجيدة غير المنفذة للماء لا يحدث لها تحول كربونى إلا فى حدود طبقة سطحية رقيقة (عدة ملليمترات) حتى عندما يصبح المبنى قديماً ولكن الخرسانة الرديئة المنفذة للماء يحدث لها تحول كربوني بعمق يصل إلى عشرة أضعاف عمق التحول فى الخرسانة الجيدة.

وتحدث عملية متشابهة للتحول الكربونى فى وجود ثانى أكسيد الكبريت فى الجو المحيط بالأعضاء الخرسانية وتسمى عملية التحول الكبريتى ، وتسبب أيضا نقص قاعدية الخرسانة المحيطة بحديد التسليح ، وإذا حدث تحول كربونى وكبريتى معاً فإن ذلك سيؤدى إلى زيادة وإن كانت بسيطة فى سرعة فقد الخرسانة لقاعديتها. ولهذا يوصى بزيادة الغطاء الخرسانى لحديد التسليح فى الأجواء الملوثة بالكبريتات.

٢- أبخرة أو محاليل حامضية يتعرض لها العضو.

يفقد حديد التسلح الحماية القاعدية للخرسانة نتيجة تغلغل الأبخرة الحامضية الموجودة بالهواء - غالباً ثانى أكسيد الكربون وفى المناطق الصناعية ثانى أكسيد الكبريت- داخل الخرسانة ويعتمد هذا التغلغل على نفاذية الخرسانة Permeability بدرجة كبيرة. والخرسانة الرديئة غالباً ما تكون منفذة أما الخرسانة الجيدة فهى غير منفذة. كما يعتمد هذا التغلغل على سمك الغطاء الخرسانى. إن نفاذية الخرسانة وسمك الغطاء الخرسانى هما المسئولان عن حماية الحديد ضد المؤثرات الخارجية وتغيرهما الكبير من منشأ لآخر هو الذى يفسر التغير الكبير فى وقت بداية الصدأ فى المنشآت المختلفة المعرضة لنفس الظروف الجوية.

٣- الكلوريدات

تعتبر أيونات الكلوريدات Chloride Ions من اكثر المواد التى تدمر الحماية السلبية لحديد التسليح داخل الخرسانة. وهذه الكلوريدات من الممكن أن تكون موجودة فى الخرسانة من لحظة خلطها(مصادرها الركام أو ماء الخلط أو الإضافات المحتوية على كلوريد الكالسيوم) أو تصل إلى الخرسانة بعد إستعمال المنشأ (مصادرها مياه البحر أو المياه الجوفية). ووجود الكلوريدات -أيا كان مصدرها- فى الخرسانة يؤدى إلى تنشيط عملية الصدأ ولو كانت قاعدية الخرسانة ما زالت مرتفعة.

وصدأ الحديد نتيجة وجود كلوريدات داخل خلطة الخرسانة أخطر وأصعب فى إصلاحه من الصدأ نتيجة التحول الكربونى لأنه بينما يمكن منع حدوث مزيد من التلف فى الأعضاء التى تحولت خرسانتها السطحية كربونيا فلا توجد وسيلة فعالة لمنع التلف فى حالة وجود تركيز عال من الكلوريدات داخل خلطة الخرسانة إلا إزالة الخرسانة المعيبة تماماً من حول حديد التسليح.

وتقوم أيونات الكلوريدات الحرة - الموجودة فى الماء داخل فراغات الخرسانة - بمهاجمة حديد التسليح وتسبب له الصدأ. وميكانيكية التفاعلات الكيميائية فى هذه الحالة معقدة إلى حد كبير ولكن يمكن القول ببساطة أن أيونات الكلوريدات قادرة على تعطيل التفاعلات الحادثة على سطح حديد التسليح والتى توفر له الحماية السلبية حتى وإن كانت قاعدية الخرسانة مازالت عالية ولم يحدث لها تحول كربونى أما فى حالة حدوث تحول كربونى فإن قيماً أقل من الكلوريدات ستدمر الحماية السلبية للحديد وسيصبح معدل الصدأ أسرع.

والملاحظ أنه فى الفترة الأخيرة تم تقليل القيم المسموح بها فى المواصفات العالمية والخاصة بنسبة تركيز الكلوريدات فى الخرسانة وذلك فى ضوء التجارب والخبرة المتاحة بحيث أصبحت القيم المسموح بها الآن أقل بكثير من القيم التى كان يسمح بها سابقا. ومنع الكلوريدات من التغلغل فى الخرسانة يعتمد أساساً على عدم نفاذية هذه الخرسانة كما يعتمد على سمك الغطاء الخرسانى.

٤- وجود شروخ بالخرسانة

تعتبر الشروخ منفذاً سهلاً للأكسجين والرطوبة والكلوريدات ولذا فإن الشروخ السطحية الموازية للحديد يمكن أن تسهل عملية الصدأ والتى ستؤدى بدورها إلى حدوث شروخ جديدة. وقد يكون سبب هذه الشروخ الإنكماش اللدن أو الهبوط اللدن وهى شروخ تحدث على أسطح السقوف. وفى الحالات التى تكون فيها هذه الأسطح معرضة للأملاح تصبح هذه الشروخ مخزناً للتلوث قريباً من الحديد العلوى. والأخطر من ذلك الفجوات التى تحدث تحت حديد التسليح عندما يحدث إدماء للخرسانة ويحدث لها هبوط لدن. هذه الفجوات يصعب جداً العثور عليها كلها وتشكل مصدراً دائماً للرطوبة وسبباً قوياً للصدأ لأن حماية حديد التسليح تعتمد على تغطية الخرسانة لسطح الحديد بأكمله. والحل الأمثل فى مثل هذه الحالات هو تجنب حدوث هذه الفجوات أصلاً بالتأكد من أن خواص الخرسانة مناسبة لطريقة صبها ومعالجتها. وهذا الأمر هام جداً لمنع حدوث الصدأ.

ميكانيكية حدوث الصدأ

صدأ الحديد هو عملية كهروكيميائية تحدث عند السطح الفاصل بين حديد التسليح والخرسانة وتحتاج إلى عامل مؤكسد (الأكسجين) ورطوبة وتيار من الإلكترونات يسرى من قطب موجب إلى قطب سالب فى المعدن ويجب توفر الوسط الذى ينقل التيار الكهربى من القطب الموجب إلى السالب وهو عادة ماء أو محلول مائى به أملاح ذائبة. وتحدث فى هذه العملية مجموعة من التفاعلات الكيمائية على النحو التالى :

١- يتحلل الحديد من القطب الموجب على هيئة أيونات الحديدوز++ (Fe) حسب التفاعل:

$$2Fe \longrightarrow 2Fe^{++} + 4e^-$$

٢- تنتقل الألكترونيات المتولدة من التفاعل السابق(4e-) فى قضيب الحديد إلى منطقة القطب السالب حيث تتفاعل مع الأكسجين والماء مكونة أيونات الهيدروسيد (OH) حسب التفاعل:

$$2H_2O + O_2 + 4e^- \longrightarrow 4(OH^-)$$

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

$$2Fe^{++} + 4(OH^-) \longrightarrow 2Fe(OH)_2$$

٤- يتأكسد هيدروكسيد الحديدوز الناتج بفعل الأكسجين والماء إلى هيدروكسيد الحديدك - تفاعل ثانوى- الذى يتحلل مكوناً صدأ الحديد (أكسيد الحديد) طبقاً للتفاعل:

$$2Fe(OH)_2 \xrightarrow{(H_2O + O_2)} 2Fe(OH)_3 \longrightarrow Fe_2O_3.H_2O$$

ويعتبر أكسيد الحديد الناتج شديد الإمتصاص للماء وضعيف الإلتصاق بالحديد ، وبذلك يسهل إزالته بالذوبان البطئ تاركاً سطح الحديد ليسمح بتكون صدأ جديد ويمكن عن طريق قياس التيارالكهربائى فى قضبان الحديد الصدأة معرفة الصدأ فى القضبان التى يصعب الكشف عليها ، وهذا يساعد على تحديد درجة خطورة المنشآت الخرسانية المعرضة للصدأ. وهيدروكسيد الحديد الناتج يزيد حجمه عن حجم القضيب الأصلى زيادة كبيرة مما يؤدى إلى تولد إجهادات انفصاليةعالية حول قضبان التسليح تؤدى إلى شروخ طولية موازية للقضبان وعند زيادة الصدأ عن ذلك تبدأ الخرسانة السطحية فى التساقط.

الخلاصة

يمكن تلخيص تلف الخرسانة نتيجة صدأ الحديد بالمراحل الآتية :-

١- عند تصلد الخرسانة تتكون طبقة حماية سلبية حول قضبان الحديد نتيجة قاعدية الخرسانة (الأس الهيدروجينى من ١٢ إلى ١٤).

٢- عندما تقل قاعدية الخرسانة (أقل من ١٠) تُفقد هذه الطبقة الحامية ويصبح الحديد معرضاً للصدأ. وقاعدية الخرسانة تقل إما لوجود أبخرة حامضية أو حدوث تحول كربونى للخرسانة السطحية أو وجود الكلوريدات أو وجود شروخ سطحية بالخرسانة.

٣- التحول الكربونى يكون بطيئاً جداً فى الخرسانة الجيدة ولكن عدم جودة الخرسانة ونفاذيتها وقلة سمك الغطاء الخرسانى ووجود الشروخ السطحية ووجود رطوبة من ٥٠ الى ٧٥% تسرع بمعدله.

٤- الكلوريدات تأثيرها على صدأ الحديد يبدأ إذا زاد تركيزها فى الخلطة الخرسانية عن ٠,٣% من وزن الأسمنت ويكون تأثيرها أخطر إذا كانت من مصدر خارجى.

٥- يبدأ الصدأ عند توفر الأكسجين والرطوبة وتظهر بقع الصدأ ثم تظهر شروخ شعرية طولية موازية للحديد الرئيسى وفوقه مباشرة.

٦- إستمرار عملية الصدأ يؤدى إلى تشريخ الغطاء الخرسانى لأن أكسيد الحديد الناتج من الصدأ حجمه أكبر بكثير من حجم الحديد الأصلى.

٧- كلما إزداد الصدأ كلما زادت الشروخ فى الطول والعرض ثم تبدأ الخرسانة الخارجية فى التساقط وتظهر الأسياخ الصدأة بوضوح.

المقاومة لتأثير الكيماويات

يتعرض جزء صغير من المنشآت الخرسانية فى بعض الأحيان إلى تأثير الكيماويات ويجب الإبتعاد ما أمكن عن هذه التأثيرات لأن مقاومة الخرسانة للكيماويات غالباً أقل من مقاومتها للمؤثرات الأخرى. ومن التأثيرات الشائعة للكيماويات تأثير أملاح الكبريتات وماء البحر والمياه الحامضية الطبيعية وتتوقف مقاومة الخرسانة للكيماويات على نوع الأسمنت المستخدم فى صنعها. كما أن كثافة الخرسانة وعدم منفذيتها للماء تؤثرعلى تحمل الخرسانة بدرجة قد تفوق تأثير إختلاف نوع الأسمنت. وفيما يلى توضيح موجز عن تأثير أهم الكيماويات الشائعة على الخرسانة:

1- املاح الكبريتاتSulphates

تشتمل أملاح الكبريتات الموجودة فى التربة والمياه الجوفية والتى قد تسبب أضراراً للخرسانة على كبريتات الكالسيوم وكبريتات الصوديوم وكبريتات المغنسيوم وكبريتات البوتاسيوم وهذه الكبريتات بإستثناء كبريتات الكالسيوم تتفاعل مع هيدروكسيد الكالسيوم(الجيرالحر) Ca(OH)2 الموجود داخل الخرسانة المتصلبة وينتج من هذا التفاعل كبريتات الكالسيوم (الجبس) وفقاً للمعادلة التالية:

$$Ca\ SO4 . 2H2O + 2\ Na\ OH . 8H2O \rightarrow Ca\ (OH)2 + Na2\ SO4 . 1OH2O$$

فكبريتات الكالسيوم المتكونة تتفاعل بدورها مع ألومينات الكالسيوم لتشكل ألومينات الكالسيوم الكبريتية المائيةCalcium Sulphoaluminate ويشار إليها عادة بإسم الإترنجايت أى Etringite:

$$CaO . Al2O3 . 19H2O + 3(CaSO4 . 2H2O) + 16H2O \rightarrow$$
$$3\ CaO . A12O3 . 3CaSO4 . 32H2O\ (\text{الإترنجايت}) + Ca(OH)2$$

وتسبب بلورات الإترنجايت ضغطاً داخلياً يؤدى الى تشرخ الخرسانة وتلفها. ويتم وقاية الخرسانة فى التربة الغنية بالكبريتات وذلك بعمل طبقة من الأسفلت أو دهانها بالبيتومين أو غيرها من الطبقات العازلة على أن تكون ملتصقة تماما بسطح الخرسانة حتى لا تنفصل عنها ويمكن إستعمال الخرسانة الجيدة المخلوطة بالأسمنت البورتلاندى فى التربة المحتوية على نسبة قليلة من الكبريتات. وفى حالة التربة المحتوية على نسبة كبيرة من الكبريتات فإنه من الضرورى الإهتمام بتصميم الخلطةالخرسانية وإستعمال السمنت البورتلاندى المقاوم للكبريتات.

2-الاحماضAcids

إذا تواجد ثانى أكسيد الكربون أو ثانى أكسيد الكبريت فى ظروف جوية رطبة أو أية أبخرة (Soft) حامضية أخرى فإنها تهاجم الخرسانة فتذيب وتزيل جزءاً من الأسمنت وتكون طبقة لينة تسهل إزالتها من سطح الخرسانة. ويحدث مثل هذا التأثير فى المداخن وفى الخرسانة الموجودة فى الأجواء الصناعية مثل مسابك الحديد ووحدات إنتاج الغاز. وعموماً فإن الأحماض غير العضوية تؤثر تأثيراً شديداً - أكثر من غيرها - على الخرسانة حيث تتفاعل مع الجير الحر مكونة كلوريدات وكبريتات ونترات. وتتوقف شدة التأثير على مدى ذوبان تلك المركبات فى الماء وعلى تركيز تلك الأحماض وعلى سرعة التفاعل التى تزداد إذا كانت الأحماض ساخنة.

3- املاح الكلوريدات Chlorides

تتحد معظم أملاح الكلوريدات مع الجير الحر الموجود فى الأسمنت البورتلاندى لتكون كلوريد الكالسيوم القابل للذوبان وبالتالى يتسرب إلى خارج الخرسانة مكوناً مترسبات بيضاء على السطح مع حدوث فراغات بالخرسانة. وتكون كلوريد الكالسيوم بدرجة تركيز عالية يؤدى إلى التلف الشديد لسطح الخرسانة.

4- الزيوت الدسمة Fats

تحتوى الزيوت الدسمة الحيوانية والنباتية على أحماض تهاجم الخرسانة فتتفاعل مع أملاح الكالسيوم والجير الحر بالأسمنت البورتلاندى لتكون سليكات الكالسيوم فتجعل الخرسانة لينة وتزداد قيمة ذلك التأثير إذا كانت الزيوت دافئة أو إذا أمكنها التغلغل داخل الخرسانة.

5- الرصاصLead

إذا وجدت الرطوبة فإن الجيرالحر بالأسمنت البورتلاندى يتفاعل مع الرصاص فيحدث التلف الخرساني وكذلك يحدث تلف أكبر للرصاص. وتحدث هذه الحالة للمواسير الموجودة داخل الخرسانة حيث تتلف تلك المواسير تلفاً كاملاً لتكون أكاسيد الرصاص نتيجة للتفاعل السالف الذكر. لذلك يجب المحافظة على مواضع الرصاص داخل الخرسانة بتغطيتها وعزل سطحها عن الخرسانة.

6- السكريات وعصير الفواكهSugar

تؤثر المواد السكرية كالعسل والكلوكوز والسكر وكذلك الأحماض الموجودة بالفاكهة تأثيراً بسيطا بطيئاً على الخرسانة.

الخواص الحرارية للخرسانة

تعتبر الخواص الحرارية للخرسانة ذات أهمية كبرى فى حالة الخرسانة الكتلية حيث يجب تقدير الزيادة فى درجة الحرارة وكيفية توزيع الحرارة بالخرسانة وذلك لإمكان تصميم طريقة التبريد المناسبة لخرسانة المنشأ حتى لا تتسبب الزيادة فى الحرارة فى تشريخها وتفتتها.كما أن الخواص الحرارية ذات أهمية كبرى أيضا فى تقدير الإجهادات الناشئة بين الخرسانة وطبقات الحماية لأسطح الخرسانة حيث تتعرض الخرسانة لفارق فى درجات الحرارة بين الجو الخارجى والخرسانة المغطاة مما يؤدى إلى وجود قوى عمودية تعمل على إنفصال طبقات الحماية عن الخرسانة. ومن أهم الخواص الحرارية الرئيسية للخرسانة:

1-التمدد الحرارى Thermal Expansion

يسبب التمدد الحرارى إجهادات داخلية فى الخرسانة سيما إن كانت مقيدة الحركة وهذه الإجهادات قد تسبب شروخاً وتفتتاً فى الخرسانة إذا لم تؤخذ فى الإعتبار. ويعتمد معامل التمدد الحرارى للخرسانة بدرجة كبيرة على نوع الركام المستخدم وتدرجه وقيمة معامل التمددالحرارى للخرسانة = ١×١٠ $^{-٥}$ لكل درجة مئوية (س ه). كما أن معامل التمدد الحرارى لحديد التسليح = ١,٢ × ١٠ $^{-٥}$ لكل درجة مئوية . ولأغراض التصميم فإنه لكل من الخرسانة العادية والخرسانة المسلحة يؤخذ معامل التمدد الحرارى مساوياً ١×١٠ $^{-٥}$ لكل درجة مئوية.

$$\alpha = 1 \times 10^{-5} \text{ cm / cm . c°}$$

والإجهادات الحرارية (σ)يمكن حسابها من المعادلة:

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot (\Delta T)$$

حيثE معاير المرونة، α معامل التمدد الحرارى، (ΔT) فرق الحرارة.

مثال: إذا كان فرق درجات الحرارة المتوقع بين الجوالخارجى والخرسانة المغطاة بطبقة حماية هو عشرون درجة مئوية فإحسب إجهادات القص المتولدة بين الخرسانة وطبقة الحماية إذا كان معاير المرونة للخرسانة هو ٢٠٠ طن/سم ٢

الحل/

$$\sigma = E\,\alpha\,(\Delta T)$$

$$= 200 \times (10)^{-3} \times 1 \times (10)^{-5} \times 20$$

$$= 40 \text{ kg / cm}$$

2-الموصلية الحرارية Thermal Conductivity (k)

وتعرف بأنها كمية الحرارة التى تمر عمودياً على السطح فى وحدة الزمن خلال مقطع متجانس من المادة مساحته الوحدة وسمكه الوحدة عندما يوجد فرق فى درجات الحرارة بين سطحى المادة مقداره الوحده. وتختلف هذه الخاصية بإختلاف درجات الحرارة وإختلاف كثافة المادة ودرجة تشبعها بالرطوبة ، وتقدر بوحدات واط/ م س ه ، حيث س ه ترمز إلى وحدة درجات الحرارة المئوية.

وقيمة الموصلية الحرارية لمواد البناء الأساسية مثل الطابوق بأنواعه والخرسانة والمواد الجبسية تتراوح من ٠,٢٠ إلى ٢,٠ واط/ م س ه ، أما المواد العازلة المستخدمة فى المبانى مثل البوليسترين والفيرموكليت والخرسانة الخفيفة الخلوية فتكون لها موصلية حرارية منخفضة تتراوح بين ٠,٠٢ إلى ٠,٢ واط/ م س ه.

3- المواصلة الحرارية(C) Thermal Conductance

وتعرف بأنها كمية الحرارة التى تمر عمودياً على السطح فى وحدة الزمن خلال مقطع متجانس من المادة مساحته الوحدة عندما يوجد فرق فى درجات الحرارة بين سطحى المادة مقداره الوحده. ويمكن حساب المواصلة الحرارية بقسمة الموصلية الحرارية على سمك المادة (C = k/L) وتقدر بوحدات واط/ م ٢ س ه.

4-المقاومة الحرارية(R) Thermal Resistance

هى مقياس لقدرة المادة على تقليل سريان الحرارة خلال وحدة المساحات لسمك العينة المختبرة، ويمكن حساب مقاومة المادة للحرارة وذلك بقسمة سمك العينة(L) على الموصلية الحرارية (K) وهى مقلوب قيمة المواصلة الحرارية(C)وتقدر بوحدات م ٢ س ه / واط.

5- الحرارة النوعية للمادة(Cp) Specific Heat

هى كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة واحد كغم من المادة درجة واحدة مئوية. ويقدر بوحدات جول/ كغم س ه أو بوحدات واط . ثانية / كغم س ه.

6- السعة الحرارية لوحدة الحجوم(CV) Volumetric Heat Capacity

هى كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة وحدة الحجوم من المادة درجة واحدة مئوية ، وتقاس السعة الحرارية بوحدات جول/ م ٣ س ه. ويمكن تعيين قيمة السعة الحرارية حسابياً بحاصل ضرب الكثافة(ρ) فى الحرارة النوعية للمادة (Cp) .

$$(CV) = \rho \times (Cp)$$

7- الانتشارية الحرارية(γ) Thermal Diffusivity

الإنتشارية الحرارية تمثل سرعة إنتشار الحرارة خلال المادة أو بين سطحى المادة وهى عبارة عن ناتج قسمة الموصلية الحرارية على السعة الحرارية لوحدة الحجوم. وتقدر بوحدات م ٢/ثانية.

$$\gamma = k / CV$$

وتعتبر الموصلية الحرارية (k) من أهم الخصائص الحرارية للمواد الإنشائية يلى ذلك خصائص أخرى مثل الحرارة النوعية للمادة والإنتشارية الحرارية وتفيد دراسة هذه الخصائص فى الأحوال الآتية:

أ - معرفة كمية الحرارة المنبعثة من الخرسانة الكتلية.

ب- معرفة خواص الحوائط الخرسانية من وجهة مدى الإحتفاظ بالحرارة.

ج- معرفة مدى تكثف الرطوبة أو الرشح على سطح الخرسانة.

الجدول التالى يوضح بعض الخواص الحرارية لبعض مواد البناء ومواد العزل الحرارى الشائعة الإستخدام فى مجال الإنشاءات . علماً بأن الأرقام الواردة بالجدول تعتبر قيم إسترشادية فقط وغير ملزمة بالتحديد.

جدول بعض الخواص الحرارية لمواد البناء ومواد العزل الحرارى الشائعة الإستخدام.

المادة	الموصلية الحرارية واط/م س °	الحرارة النوعية جول / كغم س °	الكثافة كغم / م٣
خرسانة عادية	١,٤٤	٨٦٠	٢٤٠٠
حديد صلب	٤٥,٣	٥٠٠	٧٨٥٠
بياض أسمنتى	١,٠ - ٠,٩		١٥٧٠
رخام	٢,٦	٨٨٠	٢٦٠٠
زجاج عادى	١,٠	٧٥٠	٢٤٧٠
طابوق خرسانى مصمت	١,٤	٨٤٠	٢٠٠٠
طابوق أسمنتى مصمت	١,٢٥	٨٨٠	١٨٠٠
طابوق أسمنتى مفرغ	١,٦	٨٨٠	١١٤٠
طابوق طينى مصمت	١,٠	٨٣٠	١٩٥٠
طابوق طينى مفرغ	٠,٦	٨٤٠	١٧٩٠
طابوق رملى مصمت	١,٥٩	٨٣٥	١٨٠٠
طابوق رملى مفرغ	١,٣٩	٨١٠	١٥٠٠

المقاومة للحريق

مقاومة عنصر خرسانى ما للحريق هى الفترة الزمنية التى يتحمل خلالها هذا العنصر الحريق ويقاوم نفاذ اللهب والغازات الساخنة من خلاله و تتوقف مقاومة الخرسانة للحريق على العوامل الآتية:

١- سمك المنشأ الخرسانى :

تزيد المقاومة كلما زاد سمك المنشأ وتعتبر الخرسانة الكتلية أكثرالأنواع مقاومة للحريق. ولذلك يراعى فى بعض المنشأت الخرسانية ذات السمك الصغير وكذلك فى الخرسانة سابقة الإجهادPre-Stressed أن يكون الغطاء بطبقة من الخرسانة أولاً يليها طبقة من الجص.

٢- نوع المنشأ (مصمت أو مفرغ):

تقل مقاومة الخرسانة المصمتة للحريق عن المفرغة وينبغى مراعاة أن تحتفظ الخرسانة بمقاومتها للأحمال بعد تعرضها لحرارة الحريق. وغالباً فإنه إذا استمر الحريق أكثر من ساعة أو إثنين فإن ذلك يجعل الخرسانة تصل لدرجة حوالى ألف درجة مئوية مما يجعلها لا تصلح بعد ذلك كمادة إنشائية نظراً لتشريخها الشديد مع تكسرها بتمدد حديد التسليح وتفتتها فى مواضع مختلفة. وتؤثر حرارة الحريق تأثيراً سيئاً على حديد التسليح فتقل مقاومته وبالتالى إجهاد الخضوع مما يضعف تحمل الخرسانة المسلحة.

٣- نوع الركام :

يوجد بعض أنواع الركام ذات مقاومة عالية للحريق مثل الركام الخفيف الوزن(خبث الأفران - الفورموكليت - الطابوق المكسر ... إلخ) يليها كسر الحجر الجيرى ثم يأتى بعد ذلك ركام الرمل والحصو.

٤- نوع الأسمنت وكميته :

إذا تعرض الأسمنت بالخرسانة (الذى تصلد) إلى الحرارة العالية فإنه - نظراً لإحتوائه على الماء- ينكمش ثم يتمدد بعد ذلك مما يسبب تفتت للخرسانة نتيجة لتوصيلها الردئ للحرارة مما يؤدى إلى فرق كبير فى الحرارة بين خارج الخرسانة وداخلها مما يولد إجهادات تسبب شروخ وتفتت للخرسانة.

وتؤثر الحرارة العالية تأثيرا سيئاً فى حالة الأسمنت البورتلاندى نظراً لوجود الجير الحر الذى يتكلس ويعاود الإتحاد مع الماء مما يسبب الزيادة فى الحجم وبالتالى تشريخ الخرسانة فكلما قل الجير الحر بالأسمنت كلما تحسنت مقاومته للحريق. ويعتبرالأسمنت الألومينى أحسنها من هذه الوجهة نظراً لعدم احتوائه على الجير الحر. وتعتبر أكثر أنواع الخرسانة مقاومة للحريق هى تلك المصنوعة من أسمنت ألومينى و ركام خفيف أو ركام من كسر الطابوق الحرارى.

وعلى اى حال فإنه يمكن إستخدام الأسمنت البورتلاندى العادى فى عمل الخرسانة المقاومة للحرارة حتى درجة ١٥٠ درجة مئوية بشرط أن تُعمل الإحتياطات لتسخين الخرسانة تدريجياً ويكون التغير فى درجة الحرارة بطيئا. أما إذا تعرضت الخرسانة لحوالى ١٠٠٠ درجة مئوية كما فى بعض المنشآت مثل أساسات الأفران والمراجل فإننا نستخدم الخرسانة المكونة من الأسمنت الألومينى و ركام كسر الطابوق الحرارى.

تامين تحمل الخرسانة مع الزمن

على الرغم من إستيفاء الخلطة الخرسانية للمقاومة فإنه يلزم تأمين مقاومتها مع الزمن بأخذ مجموعة من العوامل المتداخلة فى الإعتبار على النحو التالى:

١- الحد الاقصى لمحتوى الاملاح والمواد الضارة فى ماء الخلط :

يشترط فى ماء خلط الخرسانة أن لايزيد محتوى الأملاح عن الحدود الموضحة فى الجدول ادناه:

الحد الأقصى لمحتوى الأملاح والمواد الضارة فى ماء الخلط

نوع الملح	الحد الاقصى غم / لتر
الأملاح الكلية الذائبة(T.D.S .)	٢,٠
أملاح الكلوريدات على هيئة Cl^-	٠,٥
أملاح الكبريتات على هيئة So3	٠,٣
أملاح الكربونات والبيكربونات	١,٠
كبريتيد الصوديوم	٠,١
المواد العضوية	٠,٢
المواد غير العضوية وهى الطين والمواد المعلقة غير الرسوبية التى تعكر ماء الخلط	٢,٠

٢- الحد الاقصى لمحتوى ايونات الكلورايد فى الخرسانة:

للوقاية من الصدأ يجب ألا يزيد التركيز الكلى لأيونات الكلوريدات الذائبة فى الخرسانة المتصلدة (والناتج من الماء والركام والأسمنت والإضافات) عند عمر ٢٨ يوما عن الحدود الواردة فى جدول ادناه :

الحد الاقصى لايونات الكلورايدالذائبة فى الخرسانة المسلحة كنسبة مئوية من وزن الأسمنت	الظروف حول الخرسانة
٠،١٥	الخرسانة المسلحة معرضة للكلوريدات.
٠،٣٠	الخرسانة المسلحة غير المعرضة للكلوريدات.

٣- الحد الاقصى لمحتوى الكبريتات فى الخرسانة:

يجب ألا يزيد المحتوى الكلى للكبريتات فى الخرسانة على ٤% من وزن الأسمنت.

٤- الحد الاقصى لمحتوى الاسمنت :

يجب ألا يزيد محتوى الأسمنت فى خلطة الخرسانة عن ٤٥٠ كغم/م ٣ ما لم تكن هناك إعتبارات خاصة قد أخذت فى التصميم لتفادى التشريخ الناتج عن أنكماش الجفاف فى قطاعات الخرسانة الرقيقة أو الإجهادات الحرارية فى القطاعات السميكة.

٥- الحد الادنى لمحتوى الاسمنت و الحد الادنى للمقاومة المميزة والحد الاقصى لنسبة الماء:
عندما تكون الخرسانة معرضه لظروف معينة مع إستخدام الأسمنت البورتلاندى العادى فإنه يمكن الإسترشاد بالجدول ادناه لتحديد الحد الأدنى لمحتوى الأسمنت فى الخلطات.

الحد الأدنى لمحتوى الأسمنت وللمقاومة المميزة فى خلطات الخرسانة المسلحة.

الظروف التى يتعرض لها المبنى بعد الإنشاء	الحد الأدنى لمحتوى الأسمنت كغم /م ٣ المقاس الإعتبارى الأكبر للركام (ملم)				الحد الأقصى لنسبة الماء/ الأسمنت	الحد الأدنى للمقاومة المميزة كغم/سم٢
	٤٠	٣٠	٢٠	١٠		
عادية: الخرسانة محمية تماماً من الظروف الجوية والظروف المحيطة الضارة.	٣٠٠	٣٥٠	٣٥٠	٣٥٠	٠,٥٠	٢٥٠
متوسطة:الخرسانةغيرالمعرضة أو المعرضة للظروف المحيطة الضارة ولكنها مدفونة دائماً تحت الماء.	٣٠٠	٣٥٠	٣٥٠	٤٠٠	٠,٤٥	٣٠٠
قاسية:الخرسانة معرضةلظروف محيطة ضارة أو لماء البحر أو لدورات من البلل والجفاف أو الغازات... إلخ.	٣٥٠	٣٥٠	٤٠٠	٤٥٠	٠,٤٠	٤٠٠

*** الحدود الواردة بالجدول لخلطات الخرسانة المسلحة المستخدمة ويمكن تخفيض أى محتوى أسمنت بمقدار ٥٠كغم/م ٣ فى حالة أستعمالها لخلطات الخرسانة العادية (غير المسلحة).**
**** إذا كان المقاس الإعتبارى الأكبر للركام يقع بين قيمتين مذكورتين فى الجدول فيؤخذ محتوى الأسمنت المناظر للمقاس الإعتبارى الأقل.**
***** يمكن إستخدام إضافات الملدنات أو الملدنات الفائقة لتقليل نسبة ماء الخلط والحفاظ على القوام المطلوب.**

٦- الخرسانة فى الضروف الكبريتية:
عندما تكون الخرسانة معرضة لأملاح الكبريتات فى التربة أو المياه الجوفية (كبريتات الصوديوم أوالبوتاسيوم أو الكالسيوم) فإنه يجب العناية بنوع الأسمنت ومحتواه ونوع الركام والمقاس الإعتبارى الأكبر للركام ونسبة الماء إلى الأسمنت ويمكن الإسترشاد بالقيم الواردة بالجدول التالى لتحديد هذه البنود.

متطلبات الخرسانة المعرضة للمهاجمة بالكبريتات.

تركيز الكبريتات فى صورة ثالث أكسيد الكبريت (So3)			نوع الأسمنت	الحد الأدنى لمحتوى الأسمنت - كغم/م ٣				الحد الأقصى لنسبة م/س	الحد الأدنى للمقاومة المميزة كغم/سم ٢
فى التربة		فى الماء الأرضى		المقاس الإعتبارى الأكبرللركام (ملم)					
So3 الكلى %	So3 فى مزيج من الماء والتربة بنسبة ٢:١ جم/لتر	جزء فى المليون		٤٠	٣٠	٢٠	١٠		
< ٠،٢	< ١،٠	< ٣٠٠	بورتلاندى عادى	٣٥٠	٣٥٠	٤٠٠	٤٠٠	٠,٥٢	
٠،٢ الى ٠،٣٥	١،٠ الى ١،٥	٣٠٠ الى ٧٠٠	بورتلاندى عادى	٣٥٠	٣٥٠	٤٠٠	٤٠٠	٠,٤٨	٢٥٠
			مقاوم للكبريتات	٣٠٠	٣٠٠	٣٥٠	٣٥٠	٠,٥٣	٢٥٠
٠،٣٥ الى ٠،٥٠	١،٥ الى ١،٩	٧٠٠ الى ١٢٠٠	مقاوم للكبريتات	٣٥٠	٣٥٠	٤٠٠	٤٠٠	٠,٥٠	٣٠٠
٠،٥ الى ١،٠	١،٩ الى ٣،١	١٢٠٠ الى ٢٥٠٠	مقاوم للكبريتات	٤٠٠	٤٠٠	٤٥٠	٤٥٠	٠,٤٥	٣٥٠
١،٠ الى ٢،٠	٣،١ الى ٥،٦	٢٥٠٠ الى ٥٠٠٠	مقاوم للكبريتات مع تغطيات واقية مناسبة	٤٠٠	٤٠٠	٤٥٠	٤٥٠	٠,٤٣	٤٠٠

ويجب ملاحظة الآتى:

* **الحدود الوارادة بالجدول تطبق على الخرسانة بركام طبيعى كما يطبق على الخرسانة قرب المياه الأرضية بأس هيدروجينى من ٦ إلى ٩ ومحتوية على كبريتات طبيعية وليست مترسبة كأملاح.**

eng.hunar@gmail.com

** إذا كان المقاس الإعتبارى الأكبر للركام يقع بين قيمتين مذكورتين فى الجدول فيؤخذ محتوى الأسمنت المناظر للمقاس الإعتبارى الأقل.

*** فى الظروف القاسية مثل القطاعات الصغيرة تحت ضغط مائى من جانب واحد أو مغمورة جزئيا يلزم أن يؤخذ فى الإعتبارتقليل نسبة الماء للأسمنت و/ أو زيادة محتوى الأسمنت عن الحدود الواردة بالجدول لتحقيق أقل منفذية ممكنة للخرسانة.

٧- الخرسانة المعرضة للمهاجمة المزدوجة بالكبريتات والكلوريدات :

قد تتعرض الخرسانة المسلحة لظروف المهاجمة بتركيزات عالية من الكبريتات والكلوريدات معاًويكون ذلك إما فى ماء البحر أو الماء الجوفى أو غير ذلك. وفى مثل هذه الظروف يلزم إتخاذ إحتياطات أخرى بالإضافة لتلك الإحتياطات الخاصة بالحد الأقصى لنسبة الماء إلى الأسمنت والحد الأدنى لمحتوى الأسمنت كما هو وارد فى الجدول السابق. من الإحتياطات الإضافية زيادة الغطاء الخرسانى بحيث لايقل ٧ سم للخرسانة المعرضة للبلل والجفاف ولايقل عن ٥ سم للخرسانة المغمورة. كما يجب أن يستخدم نوع أسمنت تتراوح نسبة ألومينات ثلاثى الكالسيوم به بين ٦% و ١٠ % ويمكن إستخدام الأسمنت البورتلاندى العادى الذى يفى بهذه النسب أو إستخدام الأسمنت عالى الخبث. كما يجب التأكد من أن الركام المستخدم خامل ولا يتفاعل مع قلويات الأسمنت.

٨- الخرسانة فى الضروف الحمضية :

يجب الإهتمام بمكونات وصناعة الخرسانة فى حالة التعرض لظروف حمضية ذات أس هيدروجينى أقل من ٧ . يلزم لذلك زيادة الغطاء الخرسانى وإستخدام دهانات أو تغطيات مناسبة واقية من الأحماض ، كما يجب زيادة محتوى الأسمنت وتقليل نسبة الماء إلى الأسمنت وعمل رص كامل للخرسانة. ويكون ذلك فى حالتى إستخدام أسمنت بورتلاندى عادى أو مقاوم للكبريتات. أما فى حالة وصول قيمة الأس هيدروجينى ٥,٥ أو أقل فتتخذ إحتياطات أكثر فى الحماية كما يفضل إستخدام أسمنت عالى الخبث.

٩- التفاعل القلوى للركام Alkali - Aggregate Reaction:

يوجد نوعان من التفاعل القلوى للركام هما التفاعل القلوى مع السليكا و التفاعل القلوى مع الكربونات والنوع الأول أكثر إنتشاراً. ومشكلة التفاعل القلوى للركام أنه قد لايظهر إلا بعد زمن طويل ، كما أنه لا يوجد حتى الآن إختبار سريع ودقيق يمكن من خلاله معرفة إذا كان خلط ركام معين مع أسمنت معين بنسبة معينة سيؤدى إلى ظهور هذه المشكلة أم لا ، وفى نفس الوقت لاتوجد طريقة محددة للعلاج الدائم لهذه الظاهرة. وهنا نذكر بعض الاحتياطات الخاصة فى هذاالصدد:

أ- التفاعل القلوى مع السليكا Alkali - Silica Reaction

حيث تحتوى بعض أنواع الركام على أنواع مختلفة من السليكا النشطة مثل الأوبال والكرستوباليت التى قد تتفاعل كيميائياً مع القلويات الموجودة أصلاً فى الأسمنت وغيره مثل أكسيد الصوديوم(Na2O) وأكسيد البوتاسيوم(K2O).وقد ينتج عن هذه التفاعلات مواد جيلاتنية تنتفش عند إمتصاصها للماء مما يؤدى إلى حدوث إجهادات داخلية فى الخرسانة قد تسبب تشققها أو تفتتها. وللحد من خطر التفاعل القلوى مع السليكا يمكن إتباع ما يلى:

١- إستعمال أسمنت بورتلاندى يحتوى على نسبة منخفضة من القلويات لا تتجاوز ٠,٦% محسوبة على هيئة أكسيد صوديوم (Na2O) .

٢- تحديد محتوى القلويات المكافىء لأكسيد الصوديوم فى الخلطة الخرسانية بما (Na2O) لايزيد على ٣,٠ كغم/م ٣.

٣- إحلال جزء من الأسمنت فى الخلطة الخرسانية بمواد بوزولانية وذلك بعد الرجوع إلى مصادر متخصصة لتحديد كمية البوزولانا و مدى فاعليتها.

٤- العمل على تقليل نفاذ الماء إلى الخرسانة بإستخدام أغشية أو دهانات غير منفذة للماء.

ب - التفاعل القلوى مع الكربونات Alkali - Carbonate Reaction

قد تتفاعل بعض أنواع الركام من الحجر الجيرى الدولوميتى (Dolomitic limestone) مع القلويات فى الأسمنت منتجة مركبات تؤدى -مع مرور الوقت- إلى حدوث تمدد يؤدى بدوره إلى ظهور شروخ بالخرسانة تؤثر على تحملها مع الزمن. ويجب عند إكتشاف هذه الظاهرة فى الركام إستبعاده من الإستخدام أو إستخدامه مع أسمنت لاتزيد نسبة القلويات فيه على ٠,٤%. ونظراً لأن هذه الظاهرة تتأثر بالتركيب المعدنى للركام ونسبة الكالسيت إلى الدولوميت فإنه يجب الرجوع إلى جهات متخصصة لتعيين مدى تأثير هذه الظاهرة.