الباب الحادى عشر

متانة الخرسانة (المُعَمِرية أو الديمومة)

Concrete Durability

١١-١ تعريف

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 للتدهور Deterioration سواءاً التدهور الناتج من 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.

١١-٢ أسباب تلف الخرسانة

يوجد أسباب عديدة تؤدى إلى تلف الخرسانة Deterioration يمكن تصنيفها إلى المجموعات الآتية:

أ- أسباب داخلية

وهى المتعلقة بمكونات الخرسانة أو وجود مواد ملوثة بها مثل الطين أو الطفلة 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- أسباب خارجية وهى الناتجة من الوسط المحيط بالخرسانة

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

ج- أسباب أخرى تؤثر على معدل تلف الخرسانة

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

١١-٣ مقاومة الخرسانة للتلف

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

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

١١-٤ المسامية و النفاذية و الإمتصاص

ينبغى عدم الخلط بين الإمتصاص Absorption والنفاذية Permeability 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 صلب التسليح يؤدى إلى الصدأ ودخول الأحماض والأملاح يؤدى إلى تدهور الخرسانة. كما أن نفاذية الخرسانة قد تعنى فى بعض الأحوال عدم أداء المنشأ لوظيفته كما فى حالة الخزانات المحتوية على سوائل أو حوائط البدرومات 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 المسام متصلة عن طريق أنابيب دقيقة أو مسارات شعرية أو قد تكون هذه المسام منفصلة عن بعضها. إن التركيب الداخلى لعجينة الأسمنت يحتوى على مسام 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 المسام على هيئة أنابيب دقيقة متقاطعة. وعلى ذلك فالمسام المحدودة العدد المعزولة عن بعضها البعض لن تؤدى إلى نفاذ الماء أو الهواء كما هو موضح فى شكل (١١-١).

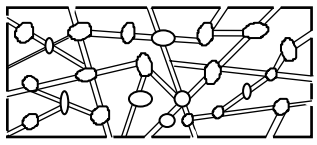
أنــواع المسـام الداخليـة

يوجد ثلاثة أنواع من المسام يمكن تمييزها كما يلى:

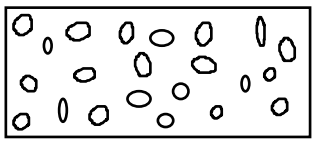
أ - المسام الهوائية ومنها الصغير جداً وهو عادة ما يتم تكوينه صناعياً داخل الخرسانة عن طريق إضافات الهواء المحبوس لزيادة القابلية للتشغيل وتحسين المقاومة للصقيع ومنها المسام الهوائية الكبيرة غير المنتظمة وهى تنشأ عادة عن عيوب الصب والدمك للخلطة الخرسانية والمسام الهوائية يتراوح قطرها من ٠,٠١ إلى ٠,٢ مم.

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

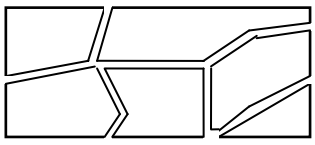
ج - المسام الشعرية Capillary Pores بعد خلط الأسمنت مع الماء مباشرة يحدث تكتل لحبيبات الأسمنت والماء ويسمى الماء الموجود فى الفراغات داخل هذا التكتل بالماء الشعرى Capillary Water حتى يحدث له تفاعل كامل مع الأسمنت ويترك مكانه خالياً مكوناً المسام الشعرية التى تعتبر أكثر أنواع المسام والتى تحدد درجة المسامية الكلية للخرسانة. والمسام الشعرية ذات قطر يتراوح من ١٠×١٠-٦ مم إلى ١٠×١٠-٣ مم (أى أنها وسط بين المسام الجيلاتينية والمسام الهوائية).



مسامية عالية ونفاذية عالية



مادة مسامية ولكن غير منفذة



نفاذية عالية ومسامية منخفضة

شكل (١١-١) حالات المسام المختلفة.

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 أسمنتات ناعمة وركام صلد غير منفذ ، كما أن تفادى الإنفصال الحبيبى عند الصب وكذلك الدمك الجيد والمعالجة المناسبة تقلل من نفاذية الخرسانة. وكما هومعلوم فإن إستخدام مواد بوزولانية مثل غبار السليكا يقلل من نفاذية الخرسانة كما سبق شرحة.

تأثير 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 (شكل ١١-٢) فزيادة كمية الماء تؤدى إلى وجود فراغات بالخرسانة عند جفافها. كذلك فى حالة زيادة الماء فإن القوام يصير مبتلاً مما يسمح بهبوط حبيبات الركام الثقيلة إلى أسفل ثم يخرج الماء إلى السطح خلال ممرات شعرية تظل موجودة بعد جفاف الخرسانة.

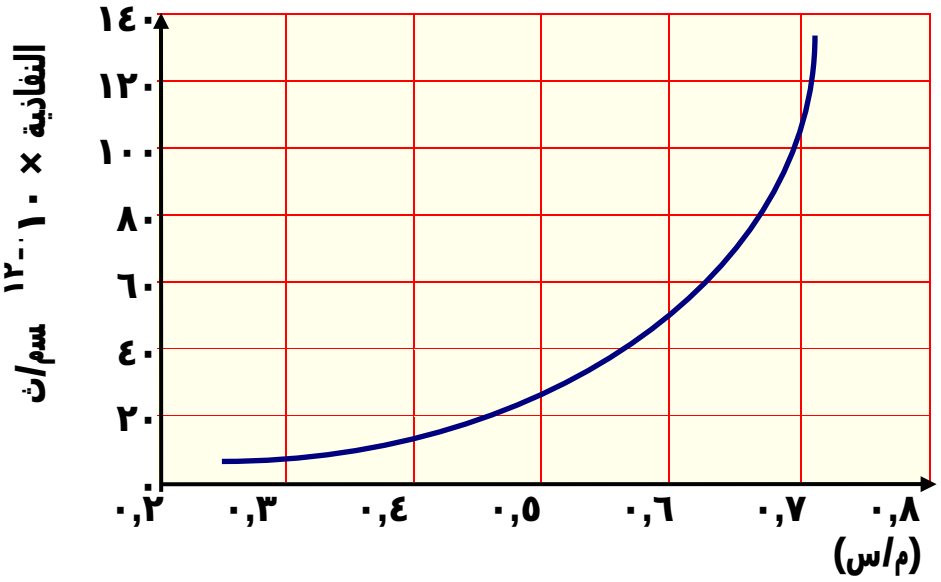
٢- الركام - يجب أن يكون الركام من النوع المصمت السليم غير المسامى كما يجب أن يكون متدرجا ويجب أن يكون من النوع الذى لا يتفاعل قلوياً مع الأسمنت حتى تتلافى وجود الفراغات الناتجة من هذا التفاعل.

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

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

ب- لتكوين طبقة سدودة تقوم بسد المسام فى الخرسانة.

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



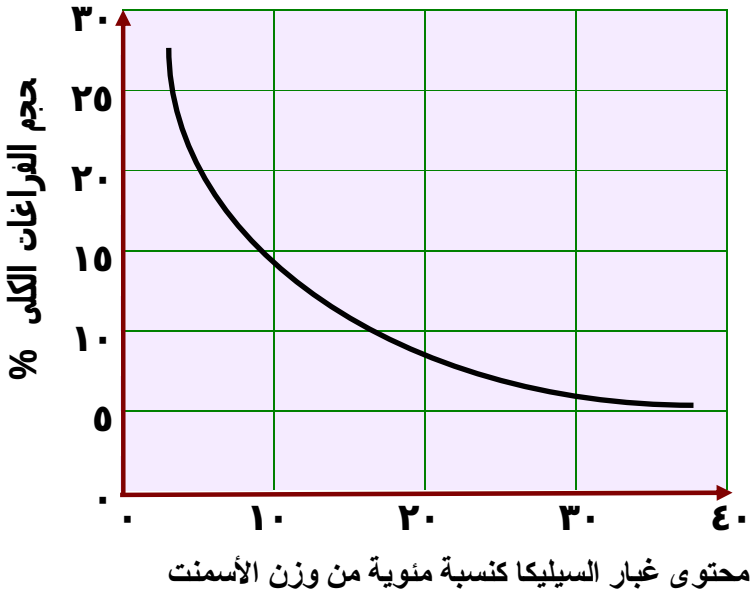
شكل (١١-٢) تأثير نسبة (م/س) على النفاذية.

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

٥- معالجة الخرسانة - إن المعالجة السيئة للخرسانة تؤدى إلى زيادة البخر وبالتالى زيادة المسام الشعرية والهوائية التى يتبخر منها الماء كما قد تؤدى إالى 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 سم٢/جم) 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 والمسام الشعرية كما هو موضح بشكل (٢-٦) وكذلك شكل (١١-٣). ومن المواد الأخرى مسحوق الرماد المتطاير Fly 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.



شكل (١١-٣) دور غبار السيليكا فى تقليل مسام العجينة الأسمنتية و تحسين المنفذية.

الإحتياطات والتوصيات لإنتاج خرسانة غير منفذة

١-يجب أن لا تكون الخلطة فقيرة الأسمنت.

٢-يجب أن تكون الخلطة لدنة بالدرجة الكافية لملء الشدة والفرم.

٣-إستعمال نسبة قليلة من م/س بقدر الإمكان وتعويض النقص فى القابلية للتشغيل بإستخدام إضافات مناسبة مثل Superplasticizer

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 والدمك لتجنب تكون جيوب هوائية ولإخراج فقاعات الهواء مع مراعاة عدم حدوث إنفصال حبيبى.

٧-إستعمال مواد سدودة للماء بعد صب الخرسانة وفك الفرم.

طـرق حمـاية الأسـطح الخرسـانيـة لجعلهـا غـير منفـذة

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 مم إلى ٥ مم.**
- **التغطية بالمواد المطاطة.**
- **الأغشية البوليمرية الجاهزة تثبت بالخرسانة.**
- **إستخدام ألواح من الصلب الذى لا يصدأ أو ألواح من البلاستيك.**
- **التبليط ببلاطات مقاومة للمواد الضارة بالخرسانة مثل السيراميك أو القيشانى.**

١١-٥ صدأ الحديد Steel Corrosion

إن صدأ حديد التسليح هو أكثر مشاكل المنشآت انتشاراً فى منطقتنا العربية 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 ـشروخ رفيعةـ عند أسياخ التسليح أو بقع صدأ وقد يزيد فيؤدى إلى تساقط الخرسانة المكونة للغطاء الخرسانى Spalling وقد يصل الصدأ إلى حدوث إنهيار للعضو الخرسانى بأكمله.

وخطورة صدأ الحديد أنه يبدأ ويستمر لمدة طويلة بدون ظهور أعراض وذلك لأن التدهور 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 المتدهور لخرسانة أصابها الصدأ يعتمد كلية على الفهم السليم لأسباب حدوث الصدأ ووسائل السيطرة عليه ومنعه من الإستمرار. والحقيقة أن الرطوبة والأكسجين هما وقود عملية الصدأ الذى يبدأ حينما تفقد الحماية التى توفرها الخرسانة للأسياخ 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 الأسياخ ويبدأ الصدأ.

كيف تحمى الخرسانة الأسياخ من الصدأ ؟

الحماية التى توفرها الخرسانة للأسياخ ضد الصدأ ذات شقين:

أ- تكون طبقة حماية سلبية (Passive Protection Layer) على سطح الأسياخ

وترجع هذه الحماية إلى أن الخرسانة المحيطة بالأسياخ قاعدية ذات أس هيدروجينى (pH) يتراوح من ١٢ إلى١٤ وعند هذه القيمة للأس الهيدروجينى فإن التفاعلات الكيميائية التى تحدث على سطح أسياخ 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 Fe_2O_3 - فتلتصق بسطح السيخ وتمنع حدوث صدأ الحديد - وبذلك تصبح قاعدية الخرسانة المحيطة بأسياخ التسليح هى سبب حماية هذه الأسياخ ، وعملياً فإن هذه الحماية فعالة لمدة طويلة إلا إذا فقدت 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 الأسياخ وهذا الحاجز هو الغطاء الخرسانى للأسياخ Cover.

أسباب حدوث صدأ الحديد

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

١- التحول الكربونى للخرسانة فى الغطاء الخرسانى Carbonation.
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 أسياخ الحديد وخاصة إذا كانت الشروخ موازية لصلب التسليح.

أولاً: 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 - هيدروكسيد الكالسيوم - محولاً إياها إلى كربونات فى وجود الرطوبة :

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

وكنتيجة لذلك تقل قاعدية الخرسانة إلى أقل من المستوى المطلوب لتوفير الحماية السلبية للأسياخ (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 جداً (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 باسياخ 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 لصلب التسليح فى الأجواء الملوثة بالكبريتات.

ثانياً: الخرسانة 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 الأسياخ ضد المؤثرات الخارجية وتغيرهما الكبير من منشأ لآخر هو الذى يفسر التغير الكبير فى وقت بداية الصدأ فى المنشآت المختلفة المعرضة لنفس الظروف الجوية.

ثالثاً: الكلوريدات Chlorides

تعتبر أيونات الكلوريدات Chloride Ions من أكثر المواد التى تدمر الحماية السلبية لصلب 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 التدهور فى الأعضاء التى تحولت خرسانتها السطحية كربونيا فلا توجد وسيلة فعالة لمنع التدهور فى حالة وجود تركيز عال من الكلوريدات داخل خلطة الخرسانة إلا إزالة الخرسانة المعيبة تماماً من حول أسياخ التسليح.

وتقوم أيونات الكلوريدات الحرة - الموجودة فى الماء داخل فراغات الخرسانة - بمهاجمة صلب 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 كربونىفإن قيماً أقل من الكلوريدات ستدمر الحماية السلبية للحديد وسيصبح معدل الصدأ أسرع.

والملاحظ أنه فىالفترة الأخيرة تم تقليل القيم المسموح بها فىالمواصفات 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.

رابعاً: وجود شروخ بالخرسانة

تعتبر الشروخ منفذاً سهلاً للأكسجين والرطوبة والكلوريدات ولذا فإن الشروخ السطحية الموازية للأسياخ 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 البلاطات. 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 أسياخ 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 أسياخ التسليح تعتمد على تغطية الخرسانة لسطح السيخ 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 صلب 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 - أنظر شكل (١١-٤).

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 سيخ الحديد إلى منطقة القطب السالب حيث تتفاعل مع الأكسجين والماء مكونة أيونات الهيدروكسيل (OH) حسب التفاعل:

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

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

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

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

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

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 التيار الكهربائى فى أسياخ الحديد الصدأة معرفة الصدأ فى الأسياخ التى يصعب الكشف عليها ، وهذا يساعد على تحديد درجة خطورة المنشآت الخرسانية المعرضة للصدأ. وهيدروكسيد الحديد الناتج يزيد حجمه عن حجم السيخ الأصلى زيادة كبيرة مما يؤدى إلى تولد إجهادات انفصالية عالية حول أسياخ التسليح تؤدى إلى شروخ طولية موازية للأسياخ وعند زيادة الصدأ عن ذلك تبدأ الخرسانة السطحية فى التساقط.

❐ الخلاصـــة

يمكن تلخيص تدهور الخرسانة نتيجة صدأ الحديد بالمراحل الآتية :-

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

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

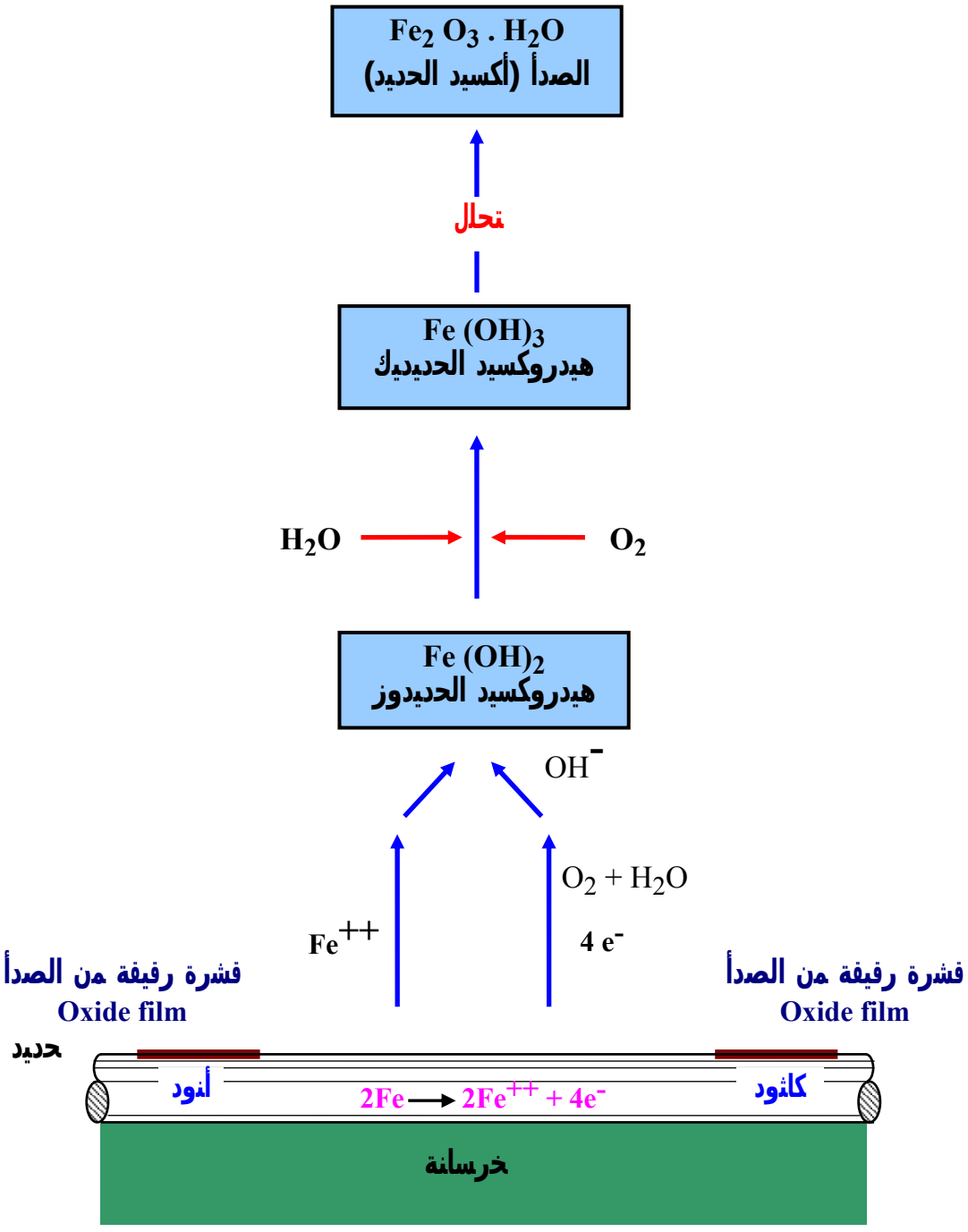
٣- التحول الكربونى يكون بطيئاً جداً فى الخرسانة الجيدة ولكن عدم جودة الخرسانة ونفاذيتها وقلة سمك الغطاء الخرسانى ووجود الشروخ السطحية ووجود رطوبة من ٥٠ - ٧٥% تسرع بمعدله.

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 كثيراً من حجم الحديد الأصلى.

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



شكل (١١-٤) ميكانيكية حدوث الصدأ فى حديد التسليح.

١١-٦ المقاومة لتأثير الكيماويات Chemical Attack

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:

١- أملاح الكبريتات Sulphates

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 $Ca(OH)_2$ (الجير الحر) الموجود داخل الخرسانة المتصلبة وينتج من هذا التفاعل كبريتات الكالسيوم (الجبس) وفقاً للمعادلة التالية:

$$Ca\,SO_4 . 2H_2O + 2\,Na\,OH . 8H_2O \rightarrow Ca\,(OH)_2 + Na_2\,SO_4 . 1OH_2O$$

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

$$4CaO . Al_2O_3 . 19H_2O + 3(CaSO_4 . 2H_2O) + 16H_2O \rightarrow$$

$$3\,CaO . A1_2O_3 . 3CaSO_4 . 32H_2O \text{ (الإترنجايت)} + Ca(OH)_2$$

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 الخلطة الخرسانية وإستعمال الأسمنت البورتلاندى المقاوم للكبريتات.

٢- الأحماض Acids

إذا تواجد ثانى أكسيد الكربون أو ثانى أكسيد الكبريت فى ظروف جوية رطبة أو أية أبخرة حامضية أخرى فإنها تهاجم الخرسانة فتذيب وتزيل جزءاً من الأسمنت وتكون طبقة لينة (Soft) 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.

٣- أملاح 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.

٤- الزيوت الدسمه 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.

٥- الرصاص Lead

إذا وجدت الرطوبة فإن الجيرالحر بالأسمنت البورتلاندى يتفاعل مع الرصاص فيحدث التلف الخرسانى 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.

٦- السكريات وعصير الفواكه Sugar

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

١١-٧ الخواص الحرارية للخرسانة Thermal Properties

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:

١- التمدد الحرارى Thermal Expansion

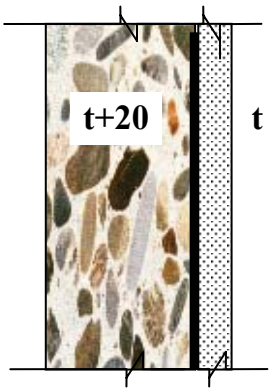
يسبب التمدد الحرارى إجهادات داخلية فى الخرسانة سيما إن كانت مقيدة الحركة وهذه الإجهادات قد تسبب شروخاً وتفتتاً فى الخرسانة إذا لم تؤخذ فى الإعتبار. ويعتمد معامل التمدد الحرارى للخرسانة بدرجة كبيرة على نوع الركام المستخدم وتدرجه. وقيمة معامل التمدد الحرارى للخرسانة = ١×١٠-٥ لكل درجة مئوية (س°). كما أن 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.

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

والإجهادات الحرارية (σ) يمكن حسابها من المعادلة:

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

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



مثال: إذا كان فرق درجات الحرارة المتوقع بين الجو الخارجى والخرسانة المغطاة بطبقة حماية هو عشرون درجة مئوية فإحسب إجهادات القص المتولدة بين الخرسانة وطبقة الحماية إذا كان معاير المرونة للخرسانة هو ٢٠٠ طن/سم٢.

الحـــــل

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

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

$$= 40 \ \text{kg / cm}^2$$

٢- الموصلية الحرارية Thermal Conductivity (k)

وتعرف بأنها كمية الحرارة التى تمر عمودياً على السطح فى وحدة الزمن خلال مقطع متجانس من المادة مساحته الوحدة وتخانته 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 وات/ م س° ، حيث س° ترمز إلى وحدة درجات الحرارة المئوية.

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

٣- المواصلة الحرارية Thermal Conductance (C)

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 تخانة المادة (C = k/L) وتقدر بوحدات وات/ م٢ س°.

٤- المقاومة الحرارية Thermal Resistance (R)

هى مقياس لقدرة المادة على تقليل سريان الحرارة خلال وحدة المساحات لتخانة العينة المختبرة ، ويمكن حساب مقاومة المادة للحرارة وذلك بقسمة تخانة العينة (L) على الموصلية الحرارية (K). وهى مقلوب قيمة المواصلة الحرارية (C) ، وتقدر بوحدات م٢ س° / وات.

٥- الحرارة النوعية للمادة Specific Heat (C_p)

هى كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة واحد كج من المادة درجة واحدة مئوية. ويقدر بوحدات جول/ كج س° أو بوحدات وات . ثانية / كج س°.

٦- السعة الحرارية لوحدة الحجوم Volumetric Heat Capacity (C_V)

هى كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة وحدة الحجوم من المادة درجة واحدة مئوية ، وتقاس السعة الحرارية بوحدات جول/ م٣ س°. ويمكن تعيين قيمة السعة الحرارية حسابياً بحاصل ضرب الكثافة (ρ) فى الحرارة النوعية للمادة (C_p).

$$(C_V) = \rho \times (C_p)$$

٧- الإنتشارية الحرارية Thermal Diffusivity (γ)

الإنتشارية الحرارية تمثل سرعة إنتشار الحرارة خلال المادة أو بين سطحى المادة وهى عبارة عن خارج قسمة الموصلية الحرارية على السعة الحرارية لوحدة الحجوم. وتقدر بوحدات م٢/ثانية.

$$\gamma = k / C_V$$

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.

جدول (١١-١) يوضح بعض الخواص الحرارية لبعض مواد البناء ومواد العزل الحرارى الشائعة الإستخدام فى مجال الإنشاءات طبقاً لما جاء فى المواصفات الخاصة ببنود أعمال العزل الحرارى لسنة ١٩٩٨. علماً بأن الأرقام الواردة بالجدول تعتبر قيم إسترشادية فقط وغير ملزمة بالتحديد.

جدول (١١-١) بعض الخواص الحرارية لمواد البناء ومواد العزل الحرارى الشائعة الإستخدام.

المـــــادة	الموصلية الحرارية وات/ م س ه	الحرارة النوعية جول/ كج س ه	الكثافة كج/م٣
أولاً مواد الإنشاء العامة			
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
طوب خرسانى مصمت	١,٤	٨٤٠	٢٠٠٠
طوب أسمنتى مصمت	١,٢٥	٨٨٠	١٨٠٠
طوب أسمنتى مفرغ	١,٦	٨٨٠	١١٤٠
طوب طفلى مصمت	١,٠	٨٣٠	١٩٥٠
طوب طفلى مفرغ	٠,٦	٨٤٠	١٧٩٠
طوب ليكا مفرغ	٠,٣٩	١٠٠٠	١٢٠٠
طوب فوم مصمت	٠,٢٥		٨٠٠
طوب فوم مفرغ	٠,٢		٥٣٠
طوب خفاف أبيض	٠,٣٣	٨٥٠	٩٨٥
طوب رملى وردى مصمت	١,٥٩	٨٣٥	١٨٠٠
طوب رملى مفرغ	١,٣٩	٨١٠	١٥٠٠
ثانياً مواد العزل الحرارى			
منتجات البوليسترين فوم	٠,٠٤٥ - ٠,٠٢٧		٤٠ - ١٥
منتجات الصوف الزجاجى	٠,٠٥٠ - ٠,٠٤٣		١٣٠ - ٣٠
منتجات الصوف الصخرى	٠,٠٥٥ - ٠,٠٤٣		٣٥٠ - ٧٠
مونة الأسمنت الرغوى	٠,٢٥ - ٠,١		٨٨٠ - ٤٠٠
مونة حبيبات الفوم	٠,١٩ - ٠,١١		١٠٠٠ - ٦٠٠
مونة فيرموكليت	٠,٣٠٠ - ٠,١٣٥		٩٦٠ - ٤٨٠
فيرموكليت سائب	٠,٠٦٥		١٠٠

١١-٨ المقاومة للحريق Fire Resistance

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 كبر سمك المنشأ وتعتبر الخرسانة الكتلية أكثر الأنواع مقاومة للحريق. ولذلك يراعى فى بعض المنشأت الخرسانية ذات السمك الصغير وكذلك فى الخرسانة سابقة الإجهاد Pre-Stressed أن يكون الغطاء بطبقة من الخرسانة أولاً يليها طبقة من المصيص.

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 من الصلب الطرى 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 - كسر الطوب ... إلخ) يليها كسر الحجر الجيرى ثم يأتى بعد ذلك ركام الرمل والزلط.

٤- نوع الأسمنت وكميته : إذا تعرض الأسمنت بالخرسانة (أى الذى شك وتصلد) 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. فالأسمنت الحديدى أو الإسمنت العادى المخلوط بالمواد البوزولانية أفضل من الأسمنت البورتلاندى العادى. أما الأسمنت الألومينى فيعتبر 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 الطوب 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 الطوب الحرارى.

١١-٩ تأمين تحمل الخرسانة مع الزمن Guaranty & Insurance

نص الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة لسنة ٢٠٠١ على بعض الإعتبارات و التوصيات التى تكفل وتضمن تحمل الخرسانة مع الزمن. فعلى الرغم من إستفاء الخلطة الخرسانية للمقاومة فإنه يلزم تأمين مقاومتها مع الزمن بأخذ مجموعة من العوامل المتداخلة فى الإعتبار على النحو التالى:

١- الحد الأقصى لمحتوى الأملاح والمواد الضارة فى ماء الخلط:

يشترط فى ماء خلط الخرسانة أن لايزيد محتوى الأملاح عن الحدود الموضحة فى جدول (١١-٢).

جدول (١١-٢) الحد الأقصى لمحتوى الأملاح والمواد الضارة فى ماء الخلط.

نوع الملح	الحد الأقصى جرام فى اللتر
الأملاح الكلية الذائبة (T.D.S.)	٢,٠
أملاح الكلوريدات على هيئة Cl^-	٠,٥
أملاح الكبريتات على هيئة So_3	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 الأقصى لمحتوى أيونات الكلوريدات 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 (١١-٣).

جدول (١١-٣) المحتوى الأقصى لأيونات الكلوريدات الذائبة اللازمة للوقاية من الصدأ.

الحد الأقصى لأيونات الكلوريدات الذائبة 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 الأقصى لمحتوى الكبريتات فى الخرسانة

يجب ألا يزيد المحتوى الكلى للكبريتات فى الخرسانة على هيئة كب أ٣ على ٤% من وزن الأسمنت.

٤- الحد الأقصى لمحتوى الأسمنت

يجب ألا يزيد محتوى الأسمنت فى خلطة الخرسانة عن ٤٥٠ كج/م٣ 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 الأدنى لمحتوى الأسمنت & الحد الأدنى للمقاومة المميزة & الحد الأقصى لنسبة م/س

عندما تكون الخرسانة معرضه لظروف معينة مع إستخدام الأسمنت البورتلاندى العادى فإنه يمكن الإسترشاد بالجدول رقم (١١-٤) لتحديد الحد الأدنى لمحتوى الأسمنت فى الخلطات.

جدول (١١-٤) الحد الأدنى لمحتوى الأسمنت وللمقاومة المميزة فى خلطات الخرسانة المسلحة.

الظروف التى يتعرض لها المبنى بعد الإنشاء	الحد الأدنى لمحتوى الأسمنت كج/م٣ * المقاس الإعتبارى الأكبر للركام (مم)				الحد الأقصى لنسبة الماء/ الأسمنت	الحد الأدنى للمقاومة المميزة كج/سم٢
	٤٠	٣٠	٢٠	١٠		
عادية: الخرسانة محمية تماماً من الظروف الجوية والظروف المحيطة الضارة.	٣٠٠	٣٥٠	٣٥٠	٣٥٠	٠,٥٠	٢٥٠
متوسطة:الخرسانة غير المعرضة أو المعرضة للظروف المحيطة الضارة ولكنها مدفونة دائماً تحت الماء.	٣٠٠	٣٥٠	٣٥٠	٤٠٠	٠,٤٥	٣٠٠
قاسية:الخرسانة معرضة لظروف 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 ٥٠ كج/م٣ 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 الظروف الكبريتية

عندما تكون الخرسانة معرضة لأملاح الكبريتات فى التربة أو المياه الجوفية (كبريتات الصوديوم أو البوتاسيوم أو الكالسيوم) فإنه يجب العناية بنوع الأسمنت ومحتواه ونوع الركام والمقاس الإعتبارى الأكبر للركام ونسبة الماء إلى الأسمنت ويمكن الإسترشاد بالقيم الواردة بجدول (١١-٥) لتحديد هذه البنود.

جدول (١١-٥) متطلبات الخرسانة المعرضة للمهاجمة بالكبريتات.

تركيز الكبريتات فى صورة ثالث أكسيد الكبريت (كب أ٣)		نـوع الأسمنت	الحد الأدنى لمحتوى الأسمنت - كج/م٣				الحد الأقصى لنسبة م/س	الحد الأدنى للمقاومة المميزة كج/سم٢
فى التربـة	فى الماء الأرضى		المقاس الإعتبارى الأكبر للركام (مم)					
كب أ٣ الكلى %	كب أ٣ 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 إلى ٠,٣٥	١,٠ إلى ١,٥	٣٠٠ إلى ٧٠٠	بورتلاندى عادى	٣٥٠	٣٥٠	٤٠٠	٤٠٠	٠,٤٨	٢٥٠
			مقاوم للكبريتات	٣٠٠	٣٠٠	٣٥٠	٣٥٠	٠,٥٣	٢٥٠
٠,٣٥ إلى ٠,٥٠	١,٥ إلى ١,٩	٧٠٠ إلى ١٢٠٠	مقاوم للكبريتات	٣٥٠	٣٥٠	٤٠٠	٤٠٠	٠,٥٠	٣٠٠
٠,٥٠ إلى ١,٠	١,٩ إلى ٣,١	١٢٠٠ إلى ٢٥٠٠	مقاوم للكبريتات	٤٠٠	٤٠٠	٤٥٠	٤٥٠	٠,٤٥	٣٥٠
١,٠ إلى ٢,٠	٣,١ إلى ٥,٦	٢٥٠٠ إلى ٥٠٠٠	مقاوم للكبريتات مع تغطيات واقية مناسبة	٤٠٠	٤٠٠	٤٥٠	٤٥٠	٠,٤٣	٤٠٠

ويجب ملاحظة الآتى:

* الحدود الواردة بالجدول تطبق على الخرسانة بركام طبيعى (م.ق.م ١٩٧١/١١/٩) كما يطبق على الخرسانة قرب المياه الأرضية بأس هيدروجينى من ٦ إلى ٩ ومحتوية على كبريتات طبيعية وليست مترسبة كأملاح.
** 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 الإعتبار تقليل نسبة الماء للأسمنت و/ أو زيادة محتوى الأسمنت عن الحدود الواردة بالجدول لتحقيق أقل منفذية ممكنة للخرسانة.

٧- الخرسانة فى المعرضة للمهاجمة المزدوجة بالكبريتات والكلوريدات

قد تتعرض الخرسانة المسلحة لظروف المهاجمة بتركيزات عالية من الكبريتات والكلوريدات معاً ويكون ذلك إما فى ماء البحر أو الماء الجوفى أو تربة السبخة 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 بجدول (١١-٤). 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 الظروف 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 دمك 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 ، ونفس الوقت لاتوجد طريقة محددة للعلاج الدائم لهذه الظاهرة. وعلى أى حال فإن الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية (٢٠٠١) قد تعرض لهذه الظاهرة وذكر بعض الإحتياطات الخاصة فى هذا الصدد:

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 (Na_2O) وأكسيد البوتاسيوم (K_2O). 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 (Na_2O).

٢- تحديد محتوى القلويات المكافىء لأكسيد الصوديوم (Na_2O) فى الخلطة الخرسانية بما لايزيد على ٣,٠ كج/م٣.

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.

****

****