الإسلامي ..||.. الإتجاه الإسلامي ..||.. الإتجاه الإسلامي ..||.. خدمتكم عبادة نتقرب بها إلى الله ..||.. الإتجاه الإسلامي ..||.. الإتجاه الإسلامي ..||.. الإتجاه

الباب الأول

الخرسانة Concrete

١-١ تعريف

"الخرسانة هى بنيان Structure يتركب من عدة مواد Materials والجزء الأكبر فى هذا البنيان هو الركام الذى يتماسك مع بعضه فى صورة شبيهة بالكتلة الحجرية وذلك بفعل العجينة الأسمنتية المغلفة للركام والتى تتصلد نتيجة التفاعل الكيمائى بين الأسمنت والماء"

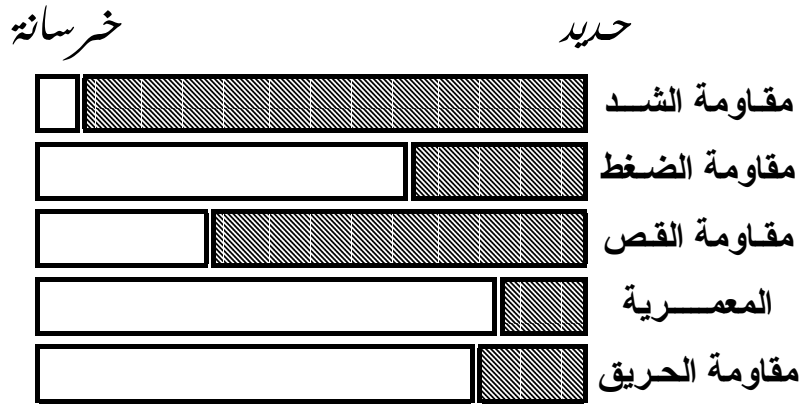
ونسب توزيع المواد المختلفة المكونة للخرسانة (بالحجم) فى أغلب الأحوال هى:

ركام (كبير وصغير)	عجينة الأسمنت	فراغات
٧٠ - ٦٠ %	٤٠ - ٣٠ %	٢ - ١ %

ويتضح من ذلك أن الركام هو المكون الأساسى لجسم الخرسانة حيث يحتل حوالى من ٣/٢ الى ٤/٣ حجم الخرسانة. والركام يعتبر مادة رخيصة نسبياً بالإضافة إلى أنه يعمل على تقليل التغير الحجمى للخرسانة الناتج من عمليتى الشك والتصلد ومن تغير الرطوبة فى عجينة الأسمنت. أما عجينة الأسمنت فتقوم بوظيفة فعالة وذلك بإيجاد التماسك بين الركام وإعطاء الخرسانة المقاومة المطلوبة وملء الفراغات بين حبيبات الركام وتسهيل إنزلاق الركام أثناء الصب.

١-٢ الخرسانة كمادة إنشائية

الخرسانة فى حالتها المتصلدة تبدو كمادة صخرية ذات مقاومة عالية للضغط أما فى حالتها الطازجة فلها خاصية اللدونة التى تسمح بتشكلها فى أى قالب معمارى مطلوب. وتعتبر الخرسانة مع الصلب أكثر المواد الإنشائية شيوعاً وإستعمالاً فى عصرنا الحديث وذلك لسهولة تواجدها والرخص النسبى للمواد المكونة لها وأيضا لسهولة ورخص تصنيعها. ويمكن إستعمال الخرسانة بالإشتراك مع مواد أخرى لتكوين قطاعات مركبة Composite Sections كما فى حالة إستخدام قطاعات الصلب مع الخرسانة أو لتكوين مواد مركبة Composite Materials كما فى حالة إضافة أنواع معينة من الألياف الى الخرسانة أثناء خلطها لتحسين بعض الخصائص المرغوبة. وتعتبر الخرسانة مع حديد التسليح مادتين متكاملتين من حيث الخواص ويتضح ذلك فى شكل (١-١).



الخاصية	الخرسانة	حديد التسليح
مقاومة الشد	ضعيف جداً	جيد جداً
مقاومة الضغط	جيد	جيد ولكن يحدث إنبعاج للقطاعات النحيفة
مقاومة القص	متوسط	جيد
المعمرية	جيد جداً	ضعيف ويتآكل إذا كان غير محمى
مقاومة الحريق	جيد	ضعيف ويفقد مقاومته سريعاً فى درجات الحرارة العالية

شكل (١-١) تكامل الخواص فى الخرسانة وحديد التسليح.

ومن أهم عيوب الخرسانة أن مقاومتها للشد ضعيفة نسبيا ولهذا فعند إستعمالها فى الأغراض الإنشائية فإنه يتم إستعمالها مع أسياخ الصلب التى تقوم بمقاومة قوى الشد.

ومن عيوب الخرسانة كذلك الحركة الناتجة من الإنكماش بالجفاف أو من الرطوبة والتى تسبب شروخا شعرية دقيقة يلزم لملافاة وجودها وضع حديد التسليح المناسب أو عمل وصلات Joints بالخرسانة على مسافات متباعدة.

كما أن الخرسانة ليست مصمتة تماماً وإنما تسمح بنفاذ السوائل والغازات بدرجات متفاوتة تعتمد على جودة الخرسانة ونسبة الفراغات بها. ونفاذ الرطوبة فى الخرسانة المسلحة يعمل على صدأ الحديد وتآكله وأيضا ينتج عنه تبقيع سطح الخرسانة وتلفها.

١-٣ تطور صناعة الخرسانة

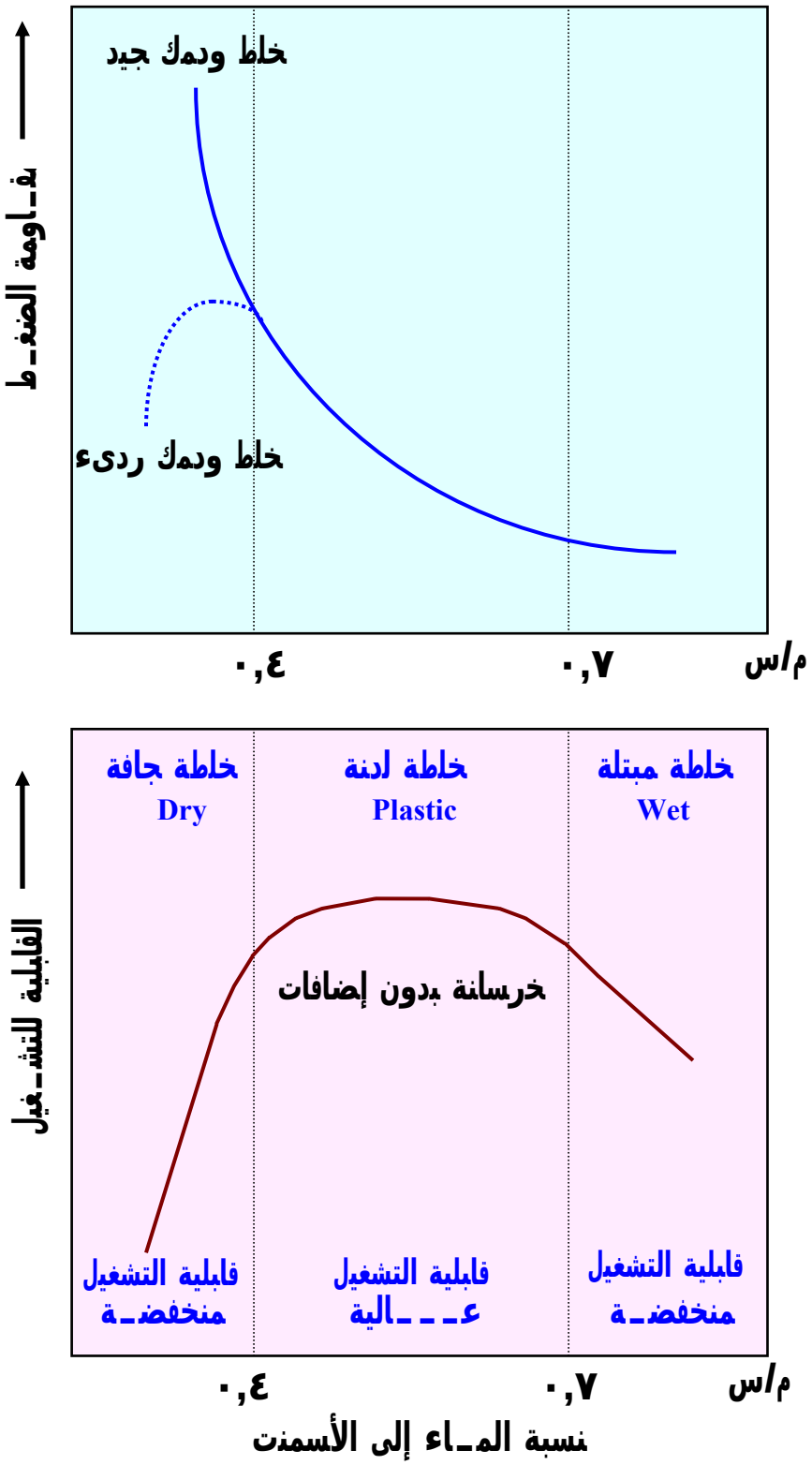
مع بداية القرن العشرين كانت الخرسانة تجاهد لكى تقف بين مواد البناء الأخرى وكانت مقاومة الضغط التى تصل إلى ١٤٠ كج/سم^2 تعتبر قيمة كبيرة ولها إعتبارها. ولم تكن هناك طرق معينة لتصميم خلطة خرسانية ولا أساليب للتصميم المختلفة كذلك لم يكن هناك الأنواع المختلفة من الأسمنت والتى تناسب الأغراض المتنوعة. كما أنه لم يكن هناك الأنواع المختلفة من الخرسانة مثل الخرسانة الخفيفة والخرسانة ذات الهواء المحبوس أو الخرسانة سابقة الصب أو سابقة الإجهاد.

فى سنة ١٩١٩ شهدت صناعة الخرسانة الثورة الأولى حيث إكتشف ابرامز Abrams أن هناك علاقة بين مقاومة الضغط للخرسانة ونسبة الماء بالخلطة وقد أوضح ابرامز أن مقاومة الضغط تزيد كلما قلت نسبة الماء إلى الأسمنت (م/س) وقد حدد هذه العلاقة كما يلى:

$$f_c = \frac{965.5}{7^{1.5(w/c)}} \qquad kg/cm^2$$

حيث f_c هى مقاومة الضغط للخرسانة كج/سم^2. و (w/c) هى نسبة الماء إلى الأسمنت بالوزن. ويلاحظ أن المعادلة السابقة قد أستنتجت لخرسانة بركام وأسمنت وظروف صناعية معينة وفى حالة إختلاف هذه المواد او هذه الظروف فإن قيمة المقدار الثابت بالمعادلة قد تتغير.

وبدراسة عملية التفاعل الكيميائى بين الأسمنت والماء وجد أن كمية الماء اللازمة لإتمام عملية التفاعل تتراوح من ٠,٢٢ الى ٠,٢٥ من وزن الأسمنت حسب نوع ودرجة نعومة الأسمنت. ولكن المشكلة تبدو أن هذه النسبة القليلة من الماء تعطى خرسانة جافة جداً صعبة التشغيل مما يضطر صانع الخرسانة إلى زيادة الماء بالقدر الذى يعطى خرسانة لدنة ذات قابلية عالية للتشغيل. وقد وضح من التجارب المعملية و الخبرة العملية أن نسبة الماء التى تعطى خلطة خرسانية لدنة ذات قابلية عالية للتشغيل (بدون إستخدام إضافات) هى من ٠,٤ إلى ٠,٧ من وزن الأسمنت ويتوقف ذلك على محتوى الأسمنت فى الخلطة وعلى نسبة إمتصاص الركام المستخدم للماء. وطبقاً للعلاقة بين نسبة الماء إلى الأسمنت ومقاومة الضغط كما هو مبين فى شكل (١-٢) فإن هذه النسبة من الماء تعطى خرسانة متوسطة المقاومة Normal Strength Concrete والحقيقة أن الخرسانة ظلت حتى وقتنا الحالى تنتج بمقاومة متوسطة تتراوح من ٢٠٠ الى ٣٠٠ كج/سم^2 ومعظم التصميمات الإنشائية فى وقتنا الحاضر تتم بإستخدام خرسانة ذات مقاومة ٢٥٠كج/سم^2 أى بإستخدام نسبة (م/س) من ٠,٤ إلى ٠,٧.



شكل (١-٢) العلاقة بين (م/س) وكلٍ من مقاومة الضغط والقابلية للتشغيل.

وعلى أى حال فإن هذه الأيام تشهد بداية ثورة ثانية فى تكنولوجيا الخرسانة حيث أمكن التغلب على التناقض الناشئ بين المقاومة العالية والقابلية المنخفضه للتشغيل وذلك بإنتاج وإستخدام بعض الإضافات المخفضة للماء Superplasticizers والتى تسمح بإستخدام نسبة ماء قليلة جداً قد تصل إلى ٠,٢٥ من وزن الأسمنت وفى نفس الوقت تعطى قابلية عالية للتشغيل وبالتالى الحصول على خرسانة ذات مقاومة عالية جداً قد تصل الى ١٤٠٠ كج/سم^{٢} وقد تم إنتاج هذه الخرسانة العالية المقاومة High Strength Concrete بالفعل فى معامل كلية الهندسة بالمنصورة حيث تم الوصول إلى خرسانة مقاومتها للضغط ١١٠٠ كج/سم^{٢} وذلك بإستخدام المواد المحلية المتاحة فى مصر.

وبالرغم من أن مثل هذه الخرسانة العالية المقاومة لم تأخذ طريقها إلى الواقع العملى فى بلادنا حتى الآن إلا أنها أصبحت شائعة الإستعمال فى دول أوربا وأمريكا واليابان وحتى فى بعض دول العالم الثالث مثل ماليزيا والتى تم فيها حديثاً إنشاء وتشييد أعلى المبانى الإدارية فى العالم [شكل (١-٣)] ويقع فى مدينة كوالا لمبور والذى يصل إرتفاعه الى ٤٥٠ متر وذلك بإستخدام خرسانة ذات مقاومة للضغط مقدارها ٨٠٠ كج/سم^{٢}. وتجدر الإشارة أن هناك بعض المشاريع الإنشائية الكبرى فى مصر قد استخدمت فيها خرسانة ذات مقاومة للضغط من ٥٠٠ إلى ٦٠٠ كج/سم^{٢} ومن هذه المشاريع: مكتبة الأسكندرية - الكوبرى الملجم بمنطقة غمرة بالقاهرة وغيرها. هذا ويتوقف التقدم والتطور فى علم الخرسانة على عدة عوامل من أهمها:

- **إستمرار البحث لتطوير المواد المكونة للخرسانة وتحسين فعاليتها وذلك لزيادة الجودة بتكاليف أقل.**
- **التعاون المستمر بين البحث العلمى والصناعة.**
- **الإعداد الفنى والتدريب المهنى المستمر للعاملين فى مجال الخرسانة.**
- **عمل حلقات دراسية وندوات علمية للوقوف على كل ما هو جديد فى مجال تكنولوجيا الخرسانة.**
- **تطبيق كل ما هو جديد فى مجال الخرسانة بصورة عملية وذلك من خلال منشآت فعلية.**
- **الدراسات الفنية اللازمة لحل مشاكل التصميم والتنفيذ للإستخدامات المتنوعة للخرسانة.**

شكل (١-٣) صورة توضح أعلى برج خرسانى فى العالم ويقع فى مدينة كوالالمبور بماليزيا .

****

الباب الثانى

الإضافات Admixtures

تتركب الخرسانة من الركام والأسمنت وماء الخلط وفى بعض الأحيان تستخدم بعض الإضافات الكيميائية بغرض تحسين بعض الصفات المعينة فى الخرسانة. وفي هذا الباب سنتناول ببعض التفصيل الإضافات الكيميائية من حيث أنواعها ووظائفها وخصائصها وكيفية الإستفادة منها.

٢-١ تعريف

الإضافات هى مواد - غير الركام والأسمنت والماء- تضاف إلى الخلطة الخرسانية أثناء عملية الخلط بكميات صغيرة جداً بغرض إعطاء الخرسانة الطازجة أو الخرسانة المتصلدة خواص معينة مطلوبة مثل:

- **تحسين القابلية للتشغيل للخرسانة الطازجة دون زيادة ماء الخلط.**
- **التعجيل أو التأخير فى الشك.**
- **تقليل معدل فقد الهبوط للخرسانة.**
- **تحسين القدرة على ضخ الخرسانة.**
- **الحد من حدوث الإنفصال الحبيبى.**

- **زيادة المقاومة المبكرة للخرسانة.**
- **الحصول على خرسانة عالية المقاومة.**
- **تحسين خواص الخرسانة المتصلدة مثل مقاومة البرى.**
- **الحصول على خرسانة غير منفذة للماء أو خرسانة خلوية أو خرسانة ذات صفات خاصة.**

٢-٢ الاشتراطات العامة المطلوبة عند إستخدام الإضافات

١- يجب أن لا تؤثر تأثيراً ضاراً على الخرسانة أو حديد التسليح.

٢- أن تتناسب الفوائد الناتجة من إستخدام الإضافات مع الزيادة فى التكاليف.

٣- يجب عدم إضافة كلوريد الكالسيوم أو الإضافات التى أساسها من الكلوريدات بتاتاً إلى الخرسانة المسلحة أو الخرسانة سابقة الإجهاد أو الخرسانة التى بها معادن مدفونة.

٤- يجب التأكد من مدى ملائمة وفاعلية أى من الإضافات بواسطة خلطات تجريبية.

٥- إذا إستخدم نوعين أو أكثر من الإضافات فى نفس الخلطة الخرسانية فيلزم أن تتواجد معلومات كافية لبيان مدى تداخلهما والتأكد من مدى توافقهما.

٦- يراعى أن سلوك الإضافات مع الأسمنتات المخلوطة أو عالية المقاومة للكبريتات يختلف عنه فى حالة الأسمنت البورتلاندى. لذلك يجب أن تتوافر معلومات كافية عن مدى الأدائية السليمة للإضافات مع الأنواع المختلفة من الأسمنت.

٧- يلزم توريد الإضافات معبأة داخل براميل أو أوعية محكمة الغلق ومطبوع عليها الإسم التجارى وتاريخ الإنتاج ومدة الصلاحية وكذلك شهادة بخواص الإضافة الموردة ومطابقتها للمواصفات القياسية ذات الصلة. كما يجب تخزين الإضافات بطريقة تحميها من الرطوبة ومن أشعة الشمس والحرارة.

٢-٣ أهم الأنواع الشائعة من الإضافات

يوجد العديد من الإضافات الكيميائية التى تستخدم مع الخرسانة ويمكن تقسيمها إلى المجموعات الآتية:

١- إضافات تخفيض الماء والتحكم فى الشك (سبعة أنواع).
٢- إضافات الهواء المحبوس.
٣- إضافات لمنع نفاذ الماء بالخرسانة.
٤- إضافات لمقاومة إجتراف الأسمنت بفعل الماء
٥- إضافات لتلوين الخرسانة.
٦- إضافات أخرى متنوعة.

٢-٣-١ إضافات تخفيض الماء والتحكم فى الشك

Water Reducing and Set Controlling Admixtures (ASTM C494)

وهذه الإضافات هى أهم وأكثر أنواع الإضافات إستخداماً وشيوعاً فى مجال الخرسانة وهى تختص بتقليل ماء الخلط (بدرجات متفاوته) والتحكم فى تصلب الخرسانة بالتأخير أو التعجيل. وتنقسم هذه المجموعة إلى سبعة أنواع مختلفة وتميزها المواصفات الأمريكية ASTM C494 بالحروف من A إلى G كما يلى:

١ـ إضافات تخفيض ماء خلط الخرسانة	ASTM C494 - Type A
٢ـ إضافات تأخير الشك	ASTM C494 - Type B
٣ـ إضافات تعجيل الشك	ASTM C494 - Type C
٤ـ إضافات تخفيض ماء الخلط وتأخير الشك	ASTM C494 - Type D
٥ـ إضافات تخفيض ماء الخلط وتعجيل الشك	ASTM C494 - Type E
٦ـ إضافات تخفيض ماء خلط الخرسانة بدرجة عالية	ASTM C494 - Type F
٧ـ إضافات تخفيض ماء خلط الخرسانة بدرجة عالية وتأخير الشك	ASTM C494 - Type G

وكما نرى فإن الأنواع السبعة السابقة بهذه المجموعة من الإضافات ينحصر تأثيرها فى واحد أو أكثر من التأثيرات الثلاث الرئيسية الآتية:

١ـ تخفيض ماء الخلط (الملدنات والملدنات الفائقة)	ASTM Type A, F
٢ـ تأخير الشك (المؤجلات)	ASTM Type B
٣ـ تعجيل الشك (المعجلات)	ASTM Type C

فنجد مثلاً أن النوع D عبارة عن مزيج من النوعين A , B.

أما النوع E عبارة عن مزيج من النوعين A , C.

فىحين نجد أن النوع G عبارة عن مزيج من النوعين B , F.

وفيما يلي شرح موجز للأنواع الرئيسية من هذه المجموعة

أولاً: مخفضات الماء (الملدنات والملدنات الفائقة) Plasticizers and Superplasticizers

ASTM C494 Type A & F

توجد الملدنات (البلاستسيزر) و الملدنات الفائقة (السوبربلاستسيزر) عموماً فى صورة سائلة وتضاف الى الخلطة الخرسانية بنسبة تتراوح من ١% إلى ٣% من وزن الأسمنت وهى أكثر وأهم أنواع الإضافات إستخداماً وشيوعاً. وقد وجد أن نسبة ٣% من الملدنات الفائقة تعطى أفضل النتائج. وتوجد الملدنات فى السوق تحت أسماء تجارية عديدة منها أدكريت - كونبلاست - سيكامنت - ملمينت ٠٠٠إلخ. والفرق بين النوعين A , F هو أن ان درجة تخفيض ماء الخلط بالنسبة للنوع A (الملدنات) تتراوح من ٦ إلى ١٢% عند ثبات قوام الخلطة الخرسانية. أما بالنسبة للنوع F (الملدنات الفائقة) فإن درجة تخفيضها للماء تزيد عن ١٢% وقد تصل إلى ٣٠% عند نفس قوام الخلطة الخرسانية.

❐ وظيفتها ❐

- تحسين خواص الخرسانة الطازجة وذلك بزيادة القابلية للتشغيل وزيادة السيولة مع ثبات نسبة (م/س) كما فى شكل (٢-١).
- الحصول على خرسانة ذاتية الدمك.
- تحسين خواص الخرسانة المتصلدة وذلك بتخفيض نسبة (م/س) فى الخلطة مع ثبات درجة القابلية للتشغيل وبالتالى الحصول على خرسانة عالية المقاومة (شكل ٢-٢).
- الحصول على خرسانة ذات مقاومة مبكرة عالية (شكل ٢-٣).
- الحصول على خرسانة عالية الأداء قليلة النفاذية.
- الحصول على خرسانة بدون إنفصال حبيبى أو نضح.

◻ طبيعة الملدنات ◻

الملدنات (A) والملدنات الفائقة (F) عبارةعن مواد بوليمرية تأخذ تركيبات كيميائية متنوعة من أهمها:

- الأساس الكيميائى للنوع A

- لجنوسلفونيت	Ligno-Sulfonate
- أحماض الهيدروإكسيكربوإكسلك	Hydroxycarboxylic Acids
- كربوهيدرات	Carbohydrates

- الأساس الكيميائى للنوع F

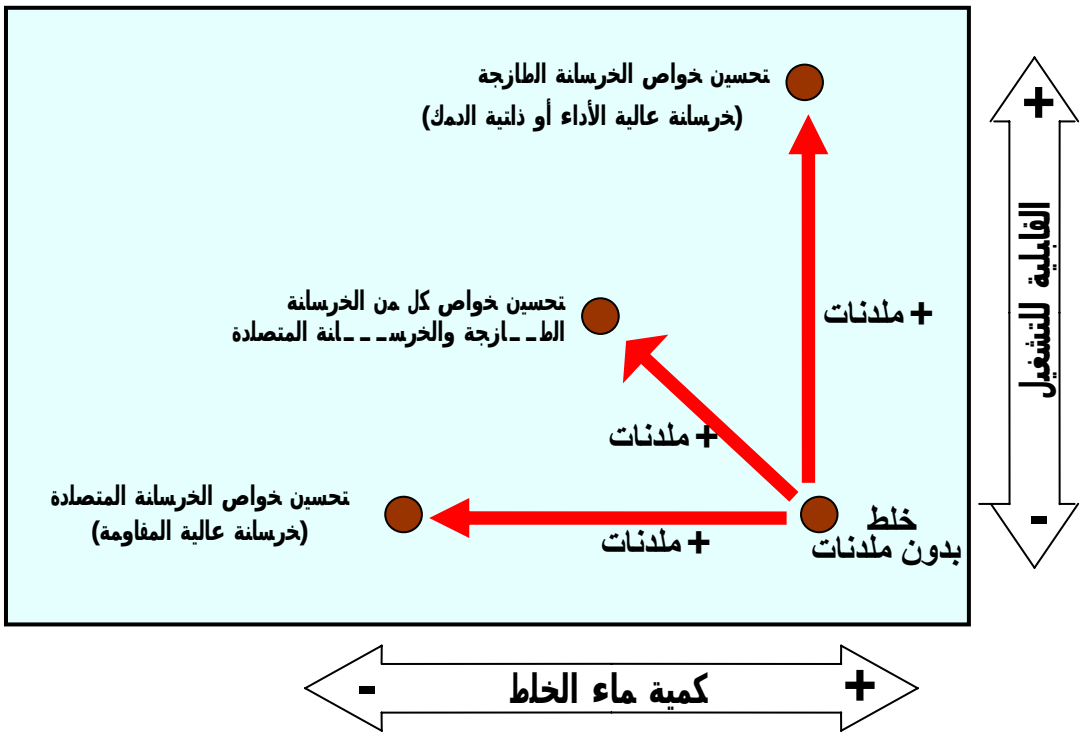
- لجنوسلفونيت معدل	Modified Ligno-Sulfonate
- ميلامين فورمالدهيد	Melamine Formaldehyde
- نفثالين فورمالدهيد	Naphthaline Formaldehyde
- فينول فورمالدهيد	Phenol Formaldehyde
- ناتج تكثيف بيتا نفثالين سلفونيت	Beta-naphthaline Sulfonate

ويمكن الحصول على النوع الأول (لجنوسلفونيت)كمنتج ثانوى من مصانع الورق. و تجدر الإشارة هنا إلى إمكانية مزج النفثالين والميلامين بكبريتات السليلوز التى تعتبر أقل تكلفة من النفثالين والميلامين بالإضافة أن كمية السكر الموجودة فى كبريتات السيليلوز فى معظم الحالات تكون مبطئة للشك مما يعنى إحتفاظ الخرسانة بتشغيليتها لفترة طويلة والتحكم بدرجة معينة فى معدل فقد الهبوط Control of Slump Loss وهو مناسب للإستخدام فى المناطق الحارة (Type D or G). وتجدر الإشارة أن تأثير الملدنات الفائقة على قوام الخرسانة لايستمر إلا لمدة من ٣٠ إلى ٦٠ دقيقة من لحظة إضافته إلى الخرسانة ، و تقل هذه المدة بإرتفاع درجة الحرارة حيث أن معدل فقد الهبوط فى الخرسانة المحتوية على الملدنات الفائقة يزداد بإزدياد درجة الحرارة.

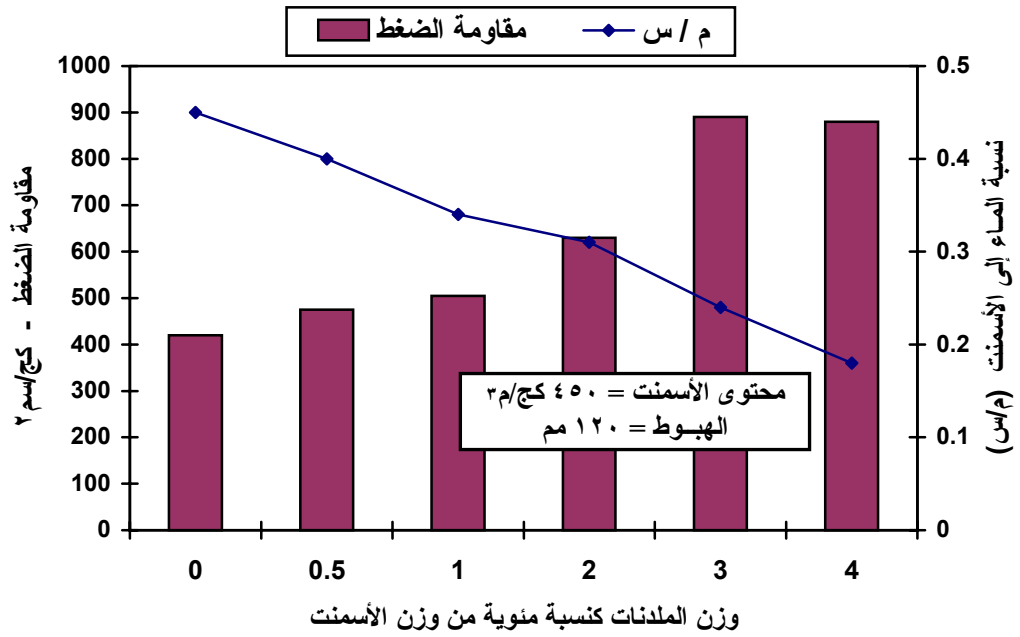
◻ أسـس إختيـار الملدنات والملدنات الفائقة ◻

ينبغي أن يكون إختيار نوع مادة الملدن على الأسس الآتية:

١- معدل تخفيض ماء الخلط
٢- معدل فقد القابلية للتشغيل
٣- التأثير على زمن الشك
٤- التوافق مع الأسمنت المستخدم
٥- المقاومة الناتجة للخرسانة
٦- الثمن و التكاليف.



شكل (٢-١) الوظائف الرئيسية للملدنات أو الملدنات الفائقة.



شكل (٢-٢) تأثير الملدنات الفائقة على كل من مقاومة الضغط ونسبة الماء إلى الأسمنت.

◻ كيف تعمل الملدنات ◻

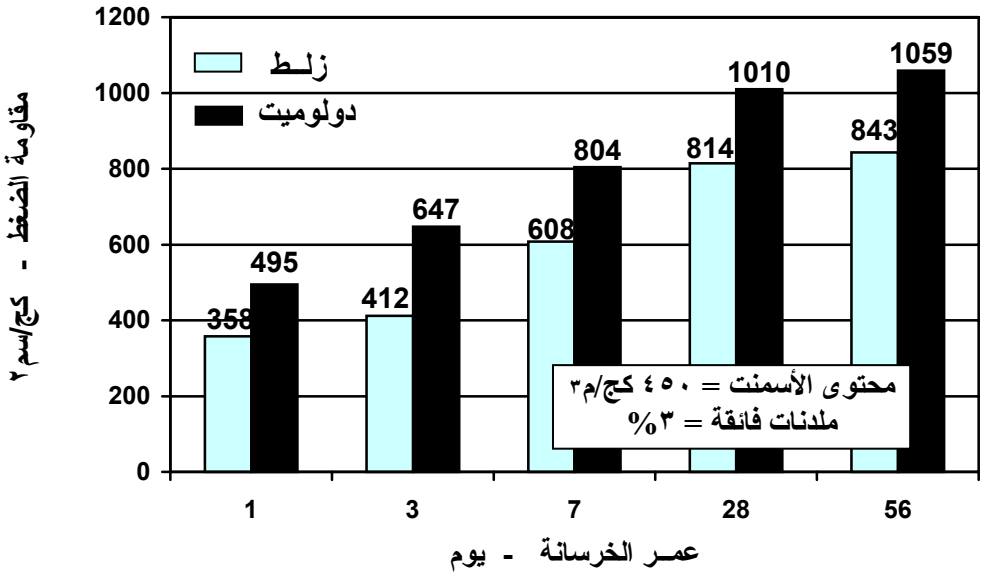
إن كيفية عمل الملدنات أو الملدنات الفائقة فى تسييل الخرسانة يأخذ واحداً أو أكثر من الصور الآتية:

١- تشتيت حبيبات الأسمنت المتكتلة وإطلاق المياه المحبوسة بينها.
٢- إحداث التنافر الكهروستاتيكى بين الجزيئات.
٣- العمل علىتشحيم الطبقة الرقيقة بين حبيبات الأسمنت.
٤- تأجيل عملية الإماهة السطحية لحبيبات الأسمنت مع ترك المزيد من المياه لتسييل الأسمنت.
٥- تقليل الشد السطحى للمياه.
٦- تغير البنية التركيبية فى منتجات تفاعلات الإماهة.

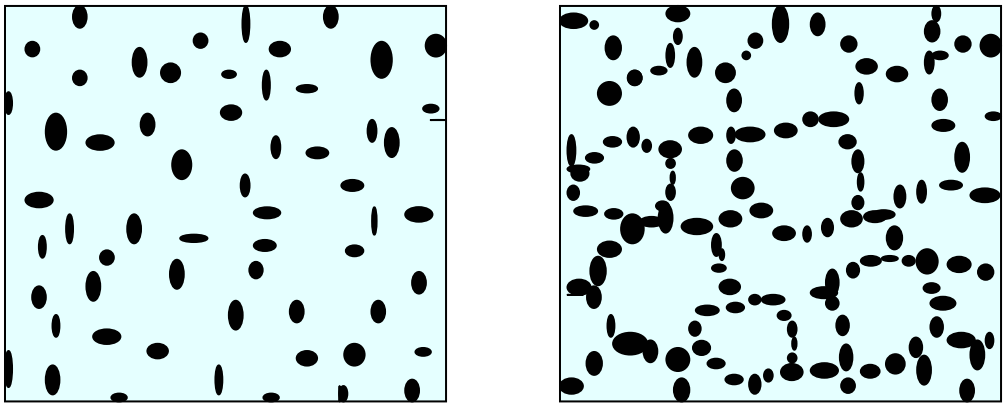
إن جزئيات الأسمنت البورتلاندى العادى تتميز بميلها الشديد للتكتل عندما تخلط مع الماء وهذا الميل هو حصيلة لتفاعلات داخلية متنوعه مثل التفاعلات الالكتروستاتيكية بين الشحنات المتضادة وكذلك تفاعلات عملية الإماهة المتنوعة. إن عملية التكتل تقود إلى تشكيل شبكة من الجزيئات كما هو موضح فى الشكل (٢-٤-أ) حيث تقوم هذه الشبكة بحجز نسبة من الماء حيث يكون هذا مطلوباً لإتمام عملية الإماهة وكذلك توفير التشغيلية المطلوبة فى الخرسانة. ويترتب على ذلك حدوث زيادة فى اللزوجة الظاهرية للنظام الأسمنتى. ودور الملدنات أو الملدنات الفائقة هنا هو العمل على فصل حبيبات الأسمنت المتكتلة عن بعضها ومن ثم الحصول على توزيع متجانس للمياه وإتصال مثالى بين المياه وحبيبات الأسمنت كما هو موضح بشكل (٢-٤-ب).

◻ إختبار عملى ◻

يمكن الوصول إلى طبيعة عمل الملدنات أو الملدنات الفائقة من حيث القيام بفصل حبيبات الأسمنت المتكتلة عن بعضها وذلك بإجراء تجربة ترسيب بسيطة حيث تُؤخذ كمية ثابته من الأسمنت وتُخلط مع الماء خلطاً جيداً ويُترك العالق فى مخبار مدرج وسنلاحظ أن جزيئات الأسمنت تكتلت وهبطت إلى القاع فى خلال وقت صغير نسبياً قد يصل إلى حوالى ٢٠ دقيقة فقط كما نلاحظ أن حجم هذه الحبيبات قد أصبح أكبر مما كان عليه ويتضح ذلك من الفارق فى الحجم المشغول فى المخبار المدرج بالأسمنت الجاف عند مقارنته بالأسمنت الرطب. بينما إذا إستخدمنا نوع معين من الملدنات أو الملدنات الفائقة مع نفس كمية الأسمنت السابقة يلاحظ أنه بعد مضى نفس الزمن السابق أن جزيئات الأسمنت ما تزال معلقة فى الماء ولا يتم ترسبها كلياً إلا بعد وقت يتراوح من ٢٤ساعة إلى ٤٨ساعة وفى هذه الحالة شكلت جزيئات الأسمنت طبقة كثيفة لها نفس حجم الأسمنت الجاف وهذه التجربة تشير بوضوح إلى أن الملدنات أو الملدنات الفائقة تكون فعالة جداً فى تفكيك جزيئات الأسمنت وتشتيتها ويمكن إستغلال هذه التجربة أيضا فى تحديد نسبة الإضافة المطلوبة للأسمنت.



شكل (٢-٣) استخدام الملدنات الفائقة للحصول على مقاومة مبكرة عالية.



(أ) بدون ملدنات (تكتل) (ب) وجود ملدنات (تشتت)

شكل (٢-٤) دور الملدنات أو الملدنات الفائقة فى فصل وتشتيت حبيبات الأسمنت المتكتلة.

ثانياً: إضافات تأخير الشك (المؤجلات) Retarders

ASTM C494 Type B

❐ وظيفتها ❐

تؤخر شك الأسمنت أى تزيد زمن شك و تصلد الخرسانة وتقلل درجة حرارة الإماهة للأسمنت فيقل معدل زيادة المقاومة Rate of Strength Gain وقد تسبب المؤجلات زيادة الإنكماش اللدن فى الخرسانة ولكن ليس لها تأثير يذكر على الخواص الطبيعية والميكانيكية للخرسانة المتصلدة.

❐ الهدف منها ❐

- عمل خرسانة فى الأجواء الحارة حيث يحدث الشك الإبتدائى للأسمنت سريعاً جداً.
- إذا كانت ظروف صب الخرسانة صعبة ويلزم جعل المونة الأسمنتية لدنة أو سائلة لمدة طويلة.
- إذا كانت هناك رسالة من الأسمنت ذات زمن شك صغير جداً.
- الحصول على خرسانة ذات ركام بارز ظاهر بسطحها.

❐ أهم المركبات المستخدمة ❐

المواد الكربوهيدراتية Carbohydrates والسكر Sugar

وأملاح الزنك Zink والفوسفات Phosphates.

ثالثاً: إضافات تعجيل الشك (المعجلات) Accelerators

ASTM C494 Type C

❐ وظيفتها ❐

تعجل أو تسرع من شك الأسمنت أى تقلل زمن شك و تصلد الخرسانة وبالتالى يزداد معدل التصلد وكذلك تزداد الحرارة المنبعثة المبكرة.

▫ الهدف منها ▫

أ- تستخدم بغرض التعجيل بالشك كما فى الأحوال الآتية:

- إزالة تأثير تأخر الشك الناتج من درجات الحرارة المنخفضة.
- إزالة تأثير تأخر الشك الناتج من إستخدام اضافة أخرى.
- أعمال الطوارئ مثل وقف رشح المياه فى الخزانات.

ب- تستخدم بغرض الحصول على خرسانة مبكرة المقاومة كما فى حالة:

- إزالة الفرم مبكراً.
- التعجيل بزمن إستخدام المنشأ الخرسانى.
- تقليل المدة المطلوبة للمعالجة.

جـ- تستخدم بغرض الحصول على خرسانة تقاوم الصقيع وذلك نتيجة الحرارة المنبعثة المبكرة.

▫ أهم المركبات المستخدمة ▫

المركبات المستخدمة كمعجلات للشك فى الخرسانة هى الهيدروكسيدات القلوية وأملاح الكربونات الذائبة والسليكات ونترات الكالسيوم وكلوريد الكالسيوم و هو الأكثر شهرة نظراً لرخص سعره و كفائته العالية فى رفع المقاومة المبكرة وتقليل زمن الشك وأملاح الكربونات الذائبة وتستخدم بنسب ١ إلى ٢% وبحد أقصى ٤% من وزن الأسمنت. ولكن من عيوب إستخدام كلوريد الكالسيوم فى الخرسانة االمسلحة هو إمكانية حدوث تآكل وصدأ فى حديد التسليح نتيجة تواجد أيونات الكلور فى وجود الرطوبة والأكسجين. لذلك يجب عدم إستخدام كلوريد الكالسيوم فى الخرسانة المحتوية على حديد تسليح. ويوجد مركبات أخرى بديلة ولكنها أقل كفاءة وأغلى ثمناً مثل نيتريت الكالسيوم وأملاح النترات والبروميدات والفلوريدات والكربونات والسليكات.

▫ إحتياطات ▫

- **عدم زيادة نسبة هذه الإضافات عن الحد الأقصى وذلك مخافة حدوث الشك الخاطف Flash Set.**
- **استخدامها فى الأجواء الحارة بحساب وحذر لتلافى حدوث شروخ الانكماش.**

٢-٣-٢ إضافات الهواء المحبوس Air Entraining Admixtures

❐ الهدف منها ❐

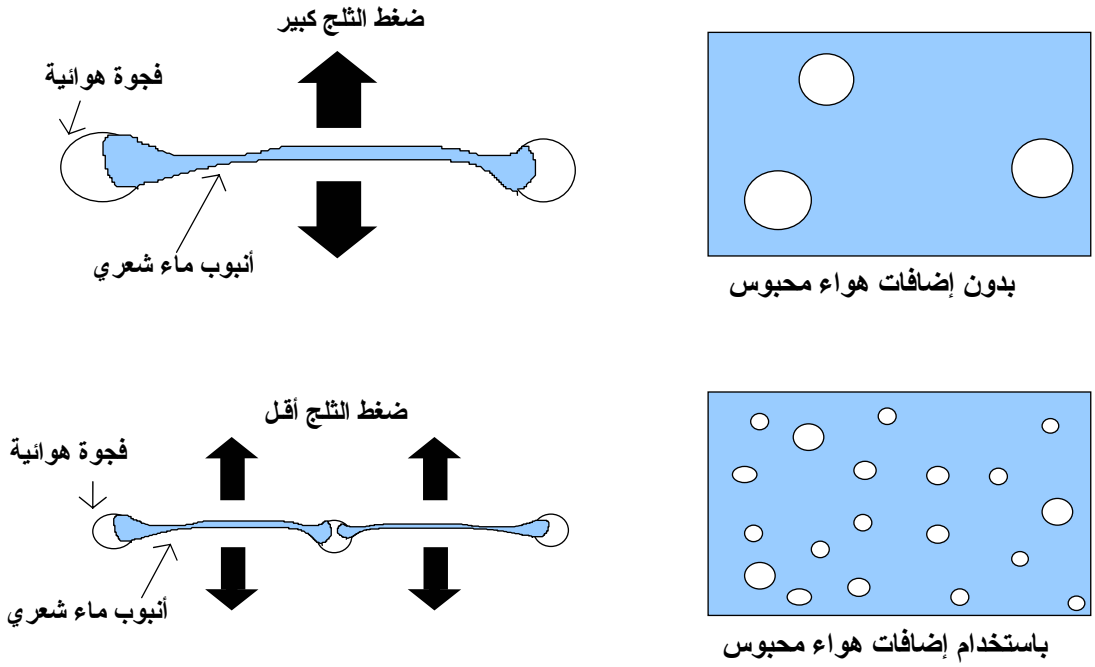
تقليل وزن الخرسانة وزيادة المتانة Durability وخاصة المقاومة للصقيع Frost Resistance ويتم ذلك عن طريق إحداث فقاعات Bubbles هوائية دقيقة (غير متصلة) موزعة توزيعاً منتظماً خلال الكتلة الخرسانية وتبقى كذلك بعد تصلد الخرسانة كما فى شكل (٢-٥).

❐ ويمكن أن يتم ذلك بطريقتين ❐

١- إضافة مواد تحدث رغاوى Foaming وذلك أثناء خلط الخرسانة مثل بعض المركبات العضوية كالأصماغ الخشبية Resins والزيوت والمنظفات الصناعية.

٢- إستخدام مواد صلبة تتفاعل مع الأسمنت وتنتج غاز الهيدروجين على هيئة فقاعات دقيقة كثيرة مثل مسحوق بودرة الألمنيوم وبودرة الزنك والماغنسيوم.

وتستخدم هذه المواد بنسب تتراوح من ٠,٠١% إلى ٠,٠٣% من وزن الأسمنت وتحدث هواء محبوس يتراوح من ٥% إلى ١٥% من حجم الخرسانة. ولا تؤثر هذه الإضافات على زمن الشك للخرسانة بينما تؤدى إلى زيادة إنكماش الجفاف وتقل المقاومة فقد وجد أن هناك علاقة عكسية بين نسبة الهواء المحبوس فى الخلطة ومقاومة الضغط للخرسانة ، حيث تقل المقاومة بمعدل حوالى ٥% تقريباً لكل نسبة هواء محبوس مقدارها ١%.



شكل (٢-٥) تأثير إضافات الهواء المحبوس فى تحسين مقاومة الصقيع.

٢-٣-٣ إضافات لمنع نفاذ الماء بالخرسانة Permeability-Reducing Admixtures

❐ الهدف منها ❐

تساعد على مقاومة نفاذ الماء إلى الخرسانة ولكنها لا تمنع نفاذ الماء تماماً. وللوصول إلى درجة عالية من مقاومة النفاذية ينبغى العناية بتصميم الخلطة الخرسانية ثم العناية بعمليتى الدمك والمعالجة.

❐ ويمكن تحسين منفذية الخرسانة من خلال المحاور الثلاثة الآتية ❐

١- إضافات صادة للماء Water Proofing Agents

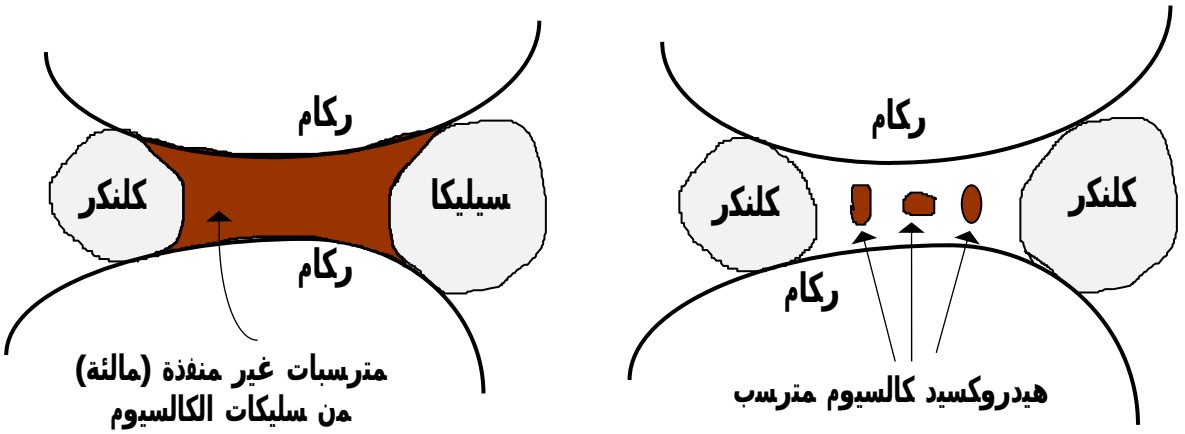
وهى تعمل على منع الخرسانة من امتصاص ماء المطر والمياه السطحية الملامسة ومن امثلتها زيوت البترول والشمع Wax وتضاف بنسبة تتراوح من ٠,١% إلى ٠,٤% من وزن الأسمنت. وتستخدم المواد البوليمرية أيضاً لهذا الغرض وذلك فى صورة دهانات لأسطح الخرسانة لسد الفجوات الهوائية والشروخ الشعرية الموجودة بالسطح.

٢- استعمال الملدنات الفائقة Superplasticizers

وهى تفيد هنا بطريقة غير مباشرة حيث أنها تعمل على تقليل ماء الخلط وبالتالى الحصول على أقل نسبة فراغات ممكنة بالخلطة ومن ثم تتحسن منفذية الخرسانة.

٣- إستعمال مواد بوزولانية مالئة للفراغات Pozzolanic Materials (Filling Effect)

والمواد البوزولانية هى المواد التى تتفاعل مع هيدروكسيد الكالسيوم الحر الناتج من تفاعل الأسمنت مع الماء مكونة مركبات غير قابلة للذوبان مثل سيليكات وألومنيات الكالسيوم والتى تعمل على سد الفجوات الداخلية والمسام الشعرية ومن أمثلتها مادة غبار السيليكا Silica Fume وهى مادة تتكون من حبيبات دقيقة جداً مساحتها السطحية حوالى أربعة إلى خمسة أمثال المساحة السطحية للأسمنت (٢٠٠٠٠ سم^{٢}/جم) وهى ناتج ثانوى Byproduct فى صناعة سبائك السيليكون والفيروسليكون. وتتفاعل مادة غبار السيليكا مع هيدروكسيد الكالسيوم مكونة سيليكات الكالسيوم المماهة والتى لاتذوب فتؤدى إلى تقليل الفجوات الداخلية والمسام الشعرية كما هو موضح فى شكل (٢-٦).



عملية الإماهة للخرسانة المحتوية على غبار السيليكا

عملية الإماهة للخرسانة المحتوية على أسمنت بورتلاندى

شكل (٢-٦) دور غبار السليكا فى تحسين منفذية الخرسانة.

٢-٣-٤ إضافات لمنع إجتراف الأسمنت بفعل الماء Antiwashout Admixtures

عند صب الخرسانة تحت الماء يعمل الماء على إجتراف الأسمنت من الخرسانة وينتج عن ذلك نقص فى مقاومتها و تعكر فى المياه المحيطة بها. ولهذا السبب يستخدم هذا النوع من الإضافات التى تعتبر من أحدث أنواع الإضافات الموجودة فى السوق حالياً. و تعمل هذه الإضافات على تكوين جل فى الماء المحيط بحبيبات الأسمنت فتحميه من الإجتراف بفعل الماء كما تعمل على زيادة اللزوجة و التماسك بين جزئيات الخرسانة و تحسن من مقاومتها للإنفصال. ويستخدم هذا النوع من الإضافات أيضاً فى إنتاج الخرسانة عالية السيولة أو الخرسانة ذاتية الدمك حيث تقوم هذه الإضافات بمقاومة الإنفصال الحبيبى وزيادة التماسك للخرسانة. وتتكون هذه الإضافات من بوليمرات أكريليكية أو مركبات سليولوزية على هيئة بودرة قابلة للذوبان فى الماء وتضاف إلى الخلطة بنسبة تقريبية ١% من وزن الأسمنت.

ولتقييم كفاءة هذه الإضافات لمقاومة الخرسانة لإجتراف الأسمنت بفعل الماء يتم إجراء إختبار سقوط الخرسانة فى الماء حيث يتم وضع كمية من الخرسانة حجمها ٣ لتر فى سلة مثقبة ثم يسمح بسقوطها ورفعها خمس مرات خلال الماء الموجود فى وعاء قطره ٣٠ سم وإرتفاعه ٥٠ سم. يتم قياس النقص فى وزن الخرسانة نتيجة إجتراف الأسمنت و تقاس درجة العكارة للماء حيث ينبغى أن لا تزيد عن ٥٠ مجم/لتر كما يقاس الأس الهيدروجينى pH للماء والذى يجب أن يقل عن ١٢,٥. كذلك تقاس مقاومة الضغط للخرسانة بعد إخراجها من الماء ، حيث يلزم أن تكون النسبة بين مقاومة الضغط للخرسانة المصبوبة تحت الماء و مقاومة الضغط للخرسانة المماثلة المصبوبة فى الهواء أكبر من ٨٠%.

ويمكن تلخيص تأثير هذا النوع من الإضافات فيما يلى:

١- تتحسن قدرة الخرسانة على مقاومة إنفصال مكوناتها.

٢- تتحسن مقاومة الخرسانة للنزيف بدرجة كبيرة.

٣- الخرسانة المحتوية على هذه الإضافات يكون لها القدرة على الإنسياب والتسوية الذاتية.

٤- النوع السليولوزى من هذه الإضافات يعمل على تأخير الشك الإبتدائى والنهائى ، حيث قد يصل الشك الإبتدائى إلى أكثر من ١٨ ساعة بينما يزيد الشك النهائى إلى ما يقرب من ٤٨ ساعة.

٥- تؤدى هذه الإضافات إلى نقص مقاومة الضغط للخرسانة المصبوبة تحت الماء بنسبة قد تصل إلى ٢٠% إذا ما قورنت بمقاومة الضغط للخرسانة المماثلة و المصبوبة فى الهواء.

٢-٣-٥ إضافات لتلوين الخرسانة Coloring Admixtures

وهى عبارة عن أكاسيد معدنية Metallic Oxide وهى متوفرة فى صورة مواد طبيعية أو صناعية ويشترط فيها أن تكون خاملة كيميائياً وأن لا تزيد نسبتها عن ١٠% من وزن الخرسانة. ومن أهم المواد المستخدمة فى ذلك:

أكسيد الحديد الأسود و الكربون	⇦	اللون الرصاصى أو الأسود
ثانى أكسيد التيتانيوم	⇦	اللون الأبيض
أكسيد الكروم	⇦	اللون الأخضر
أكسيد الحديد الأحمر	⇦	اللون الأحمر
أكسيد الحديد الأصفر	⇦	لون الكريم أو لون سن الفيل
أكسيد الحديد البني	⇦	اللون البنى

٢-٣-٦ إضافات أخرى متنوعة Miscellaneous Admixtures

يوجد العديد من الإضافات الأخرى التى تستخدم مع الخرسانة نذكر منها الآتى:

١- إضافات حقن الخرسانة.

٢- إضافات للمساعدة فى ضخ الخرسانة.

٣- إضافات لمنع تكون الرطوبة بالخرسانة.

٤- إضافات لمنع تكون الفطريات والبكتريا على الأسطح الخرسانية للمنشآت المآئية.

٥- إضافات لمنع التآكل والصدأ فى حديد التسليح.

٦- إضافات لتقليل التفاعل القلوى بين الركام والأسمنت.

٧- إضافات لتكوين الغازات داخل الخرسانة.

٨- إضافات لتحسين التماسك بين حديد التسليح والخرسانة.

****

الباب الثالث

الأنواع المختلفة (الخاصة) من الخرسانة

Special Types of Concrete

يوجد العديد من أنواع الخرسـانة ويمكن تصنيف أهم هذه الخرسانات كما يلي:

١- الخرسانة العادية	**Plain Concrete**
٢- الخرسانة المسلحة	**Reinforced Concrete**
٣- الخرسانة سابقة الإجهاد	**Prestressed Concrete**
٤- الخرسانة الجاهزة (سابقة الصب)	**Precast Concrete**
٥- الخرسانة عالية المقاومة	**High Strength Concrete**
٦- الخرسانة الليفية	**Fibrous Concrete**
٧- الخرسانة ذاتية الدمك	**Self-Compacting Concrete**
٨- الخرسانة البوليمرية	**Polymer Concrete**
٩- الخرسانة المقذوفة (خرسانة الرش)	**Shotcrete**
١٠- الخرسانة الخفيفة	**Light-Weight Concrete**
١١- الخرسانة الثقيلة	**Heavy-Weight Concrete**
١٢- الخرسانة الكتلية	**Mass Concrete**
١٣- الخرسانة المعبأة	**Prepacked Concrete**
١٤- خرسانة الركام ناقص التدرج	**Gap Concrete**
١٥- الخرسانة المعمارية	**Architectural Concrete**
١٦- خرسانة التسمير	**Nailing Concrete**
١٧- الخرسانة الكبريتية	**Sulfur Concrete**

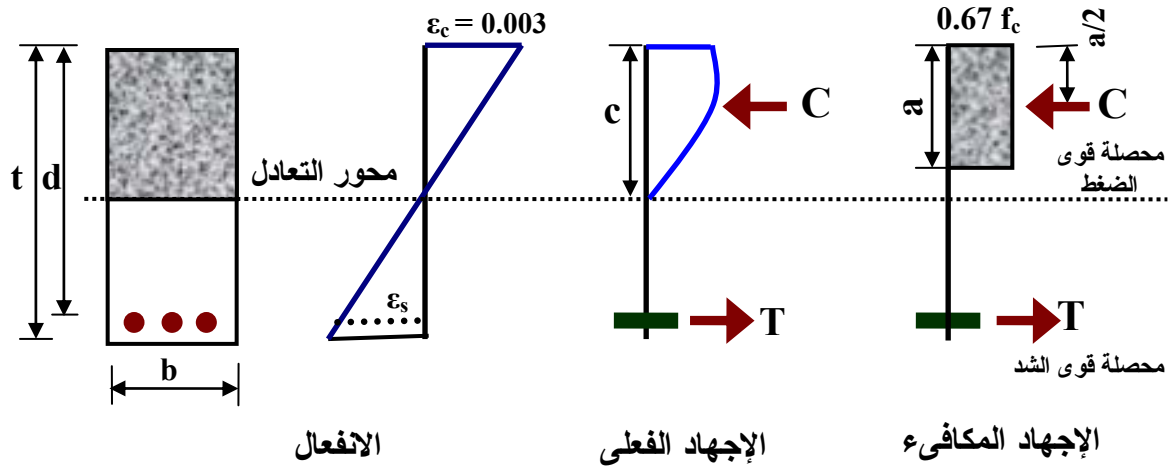
فيما يلي نبذة مختصرة عن أهم هذه الأنواع:

٣-١ الخرسانة العادية Plain Concrete

وهى خرسانة بدون أي حديد تسليح وتستخدم فى أعمال الفرشات الخرسانية تحت الأساسات والأرصفة وعمل الكتل الخرسانية الغير معرضة لإجهادات شد وعمل الأرضيات والسدود. ومقاومتها تتراوح من ١٥٠ إلى ٢٥٠ كج/سم^{٢} حسب الغرض المستخدمة من أجله. ويمكن تحسين بعض الخواص فيها لكي تناسب غرض الاستخدام ، مثلاً أن تكون مقاومة للكبريتات أو مقاومة لعوامل التعرية والتآكل كما فى حالة المصدات البحرية.

٣-٢ الخرسانة المسلحة Reinforced Concrete

وهى خرسانة عادية ويشترك معها حديد تسليح لمقاومة إجهادات الشد وهذا النوع من الخرسانة هو الأكثر شيوعاً واستخداماً فى العالم وذلك لسهولة تنفيذه ورخص تصنيعه. ويمكن أن يُصب فى الموقع مباشرة أو يُصب فى المصنع لعمل وحدات خرسانية جاهزة. وينبغي تحقيق الاتزان Equilibrium و التوافق Compatibility بين الإجهادات و الانفعالات فى كل من الخرسانة و الحديد. ومعظم كودات التصميم تهمل تماماً مقاومة الخرسانة للشد وبالتالى فإن الحديد يتحمل كل قوى الشد المؤثرة ، أما الخرسانة فتتحمل قوى الضغط. شكل (٣-١) يوضح توزيع الإجهادات والانفعالات على قطاع مستطيل من الخرسانة المسلحة.



شكل (٣-١) الإجهاد والإنفعال لعنصر من الخرسانة المسلحة ذو قطاع مستطيل معرض لعزم إنحناء .

٣-٣ الخرسانة سابقة الإجهاد Prestressed Concrete

وهى خرسانة عادية يتم إكسابها إجهادات ضغط قبل تحميلها وهذه الإجهادات تكون كفيلة بملاشاة إجهادات الشد الناتجة من تأثير الأحمال وبالتالى لا نحتاج إلى حديد تسليح حيث تكون المحصلة النهائية للإجهادات على طول القطاع الخرسانى بعد التحميل (التشغيل) هى غالباً إجهادات ضغط وبالتالى تكون الخرسانة كفيلة بتحملها. وبناءاً عليه يجب أن تكون الخرسانة ذات مقاومة عالية للضغط تتراوح من ٣٥٠ إلى ٦٠٠ كج/سم^{٢} وذلك حتى يمكنها تحمل إجهادات ضغط التصنيع وإجهادات ضغط التشغيل. وأسياخ الصلب المستخدمة فى الخرسانة سابقة الإجهاد تسمى كابلات Tendons وهى عبارة عن أسلاك Wires أو حبال مجدولة من مجموعة أسلاك Strands أو قضبان من الصلب Bars. وتمتاز الخرسانة سابقة الإجهاد بقلة الشروخ السطحية مع مقاومة عالية للأحمال. وهى مناسبة للاستخدام فى الكبارى والمستودعات المائية والوحدات الجاهزة مثل فلنكات السكك الحديدية وأعمدة التلغراف. وعموماً يوجد طريقتان لإكساب الخرسانة لإجهادات الضغط:

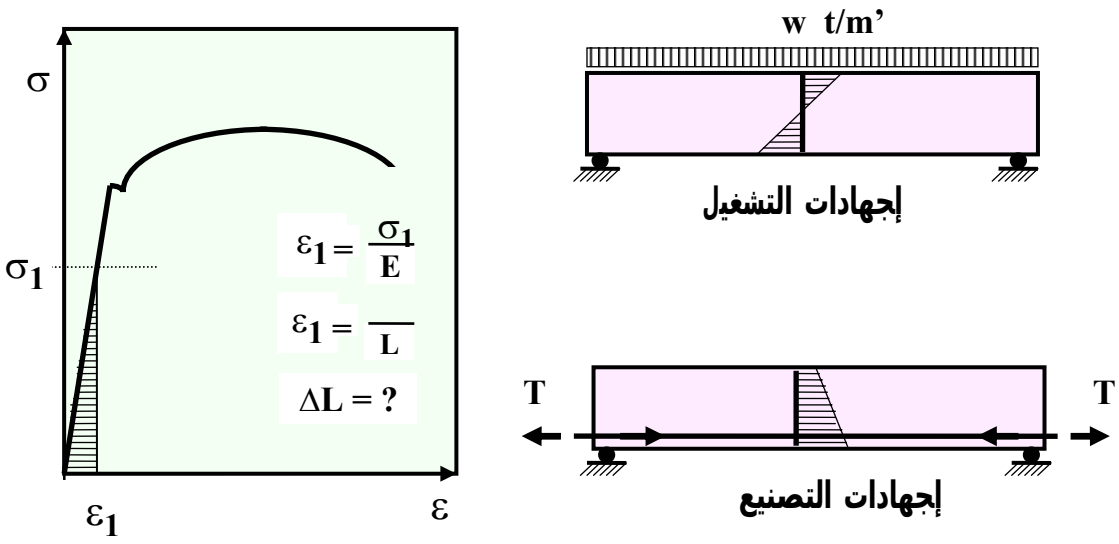
أ- طريقة الشد السابق Pre-tension

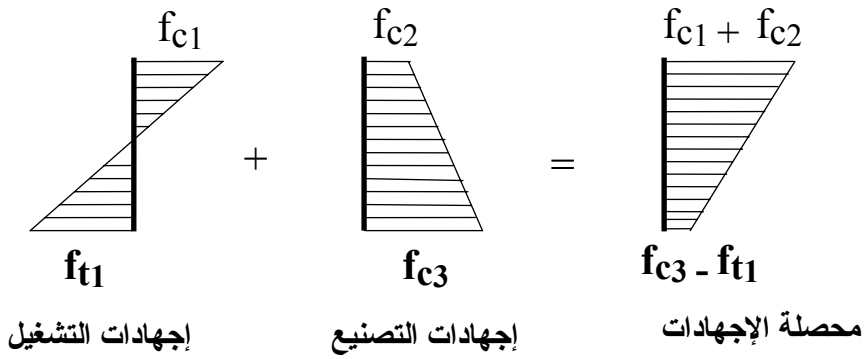
وفيها يتم شد كابلات الصلب قبل صب الخرسانة وقبل تصلدها. وتترك هذه الكابلات مشدودة (فى حدود المرونة) حتى تتصلد الخرسانة وتكتسب مقاومتها القصوى ثم بعد ذلك يتم رفع وإزالة قوى الشد من الصلب الذى يحاول أن ينكمش داخل الخرسانة المتصلدة مما يؤدى إلى حدوث إجهادات ضغط فى الخرسانة عن طريق قوى التماسك بين الحديد و الخرسانة كما بشكل (٣-٢). وتستخدم طريقة الشد السابق فى إنتاج الوحدات سابقة الصب سابقة الإجهاد حيث تسمح المعالجة بالبخار واستخدام خرسانة عالية المقاومة المبكرة فى الإزالة المبكرة لتلك الوحدات والاستغلال اليومي للقوالب.

ب- طريقة الشد اللاحق Post-tension

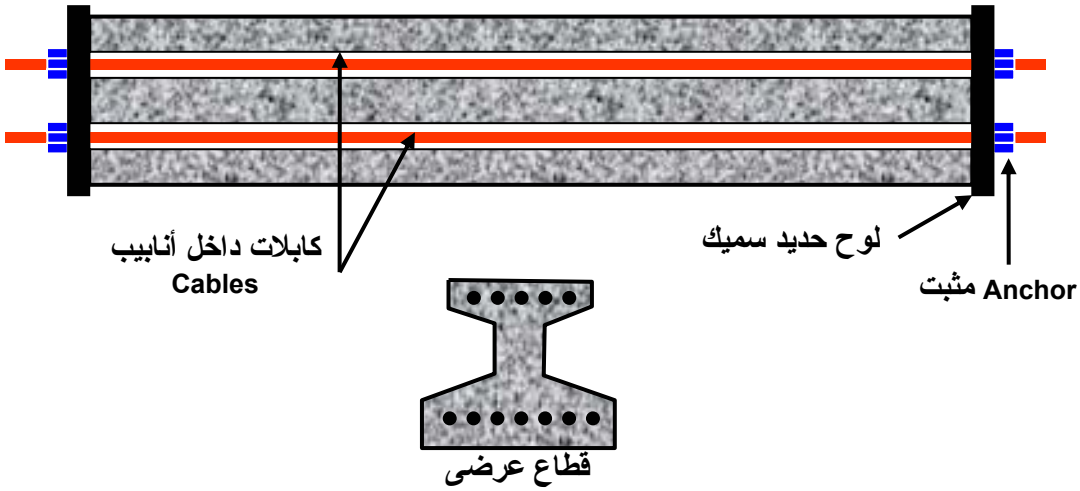
وفيها يتم عمل أنابيب مفرغة (مواسير أو أجربة) داخل الخرسانة وتوضع كابلات الصلب حرة الحركة بداخلها بدون شد حتى تتصلد الخرسانة تماماً (شكل ٣-٣). يتم شد الكابلات بعد تصلد الخرسانة حيث لا يكون هناك أى قوى تماسك بين الصلب و الخرسانة. بعد ذلك يتم رفع وإزالة قوى الشد من الصلب حيث يسبب إجهادات ضغط على ألواح الصلب المثبتة فى طرفى العنصر الخرسانى والتى تنتقل بدورها إلى الخرسانة بالتحميل. بعد ذلك تملأ الفراغات بين كابلات الصلب والمواسير بمونة الجراوت التى تتصلد وتقلل من فرصة صدأ صلب الكابلات.

هذا وفى الكود المصري لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة ـ طبعة ٢٠٠١ـ فقد تم تخصيص الباب العاشر للخرسانة سابقة الإجهاد حيث التعرف على كافة الاعتبارات الخاصة بالمواد المستخدمة فى هذه الخرسانة وتصميم قطاعاتها ونظم التحليل الإنشائى لها و التفتيش وضبط الجودة الخاص بهذه الخرسانة.





شكل (٣-٢) توضيح لطريقة الشد السابق.



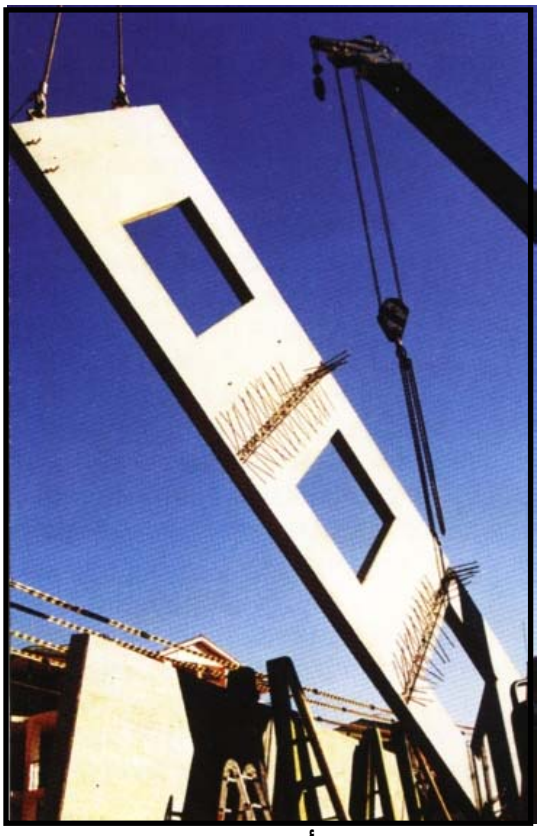
شكل (٣-٣) توضيح لطريقة الشد اللاحق.

٣-٤ الخرسانة الجاهزة (سابقة الصب) Precast Concrete

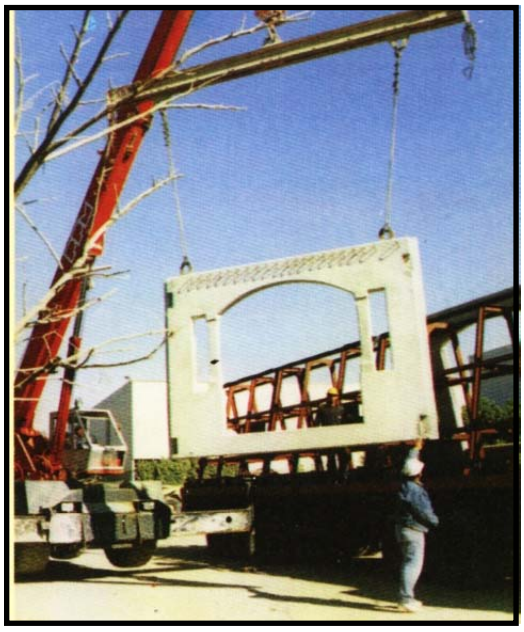
تصب الخرسانة وتعالج حتى تمام تصلدها فى المصنع ثم بعد ذلك تنقل إلى المنشأ وممكن أن تكون خرسانة عادية أو مسلحة أو سابقة الإجهاد وتشمل البلاطات والأعمدة والحوائط والبلوكات الخرسانية والفلنكات ووحدات الأسوار والسلالم. وفيها يتم التحكم فى عملية جودة الخرسانة والتصنيع مثل:

١- استخدام ركام جيد متدرج
٢- تقليل الماء
٣- إجراء الدمك والخلط ميكانيكا
٤- معالجة بالبخار
٥- استخدام إضافات للتلوين
٦- استخدام المواد العازلة المطلوبة

وتوضح الأشكال (٣-٤) ، (٣-٥) بعض التطبيقات التى تستخدم فيها الخرسانة سابقة الصب بنجاح. وعند تصنيع العناصر المختلفة من الخرسانة الجاهزة فيجب الأخذ فى الاعتبار كافة الأحمال الخارجية المؤثرة على العنصر فى مراحل التصنيع والتخزين والنقل و التركيب والتنفيذ والاستخدام.



حائط خرساني ثلاثة أدوار بارتفاع ٩,٨ متر.



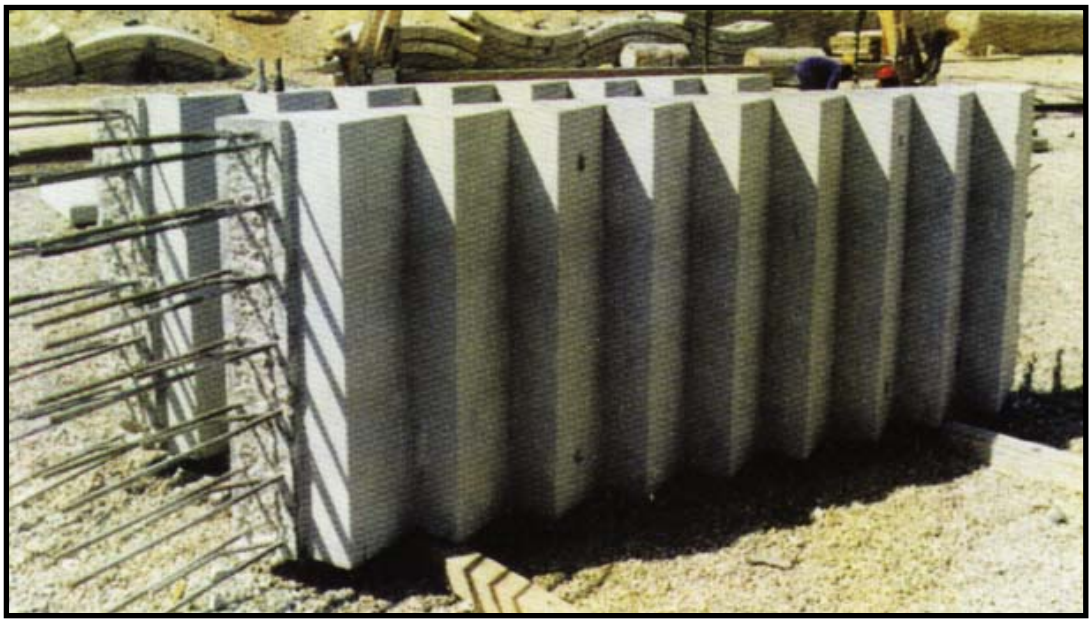
حائط خرساني ذو شكل معماري مميز.

شكل (٣-٤) بعض الحوائط من الخرسانة سابقة الصب .

سور من الخرسانة سابقة الصب بمدينة السادس من أكتوبر

مجارى خرسانية لتصريف مياه الأمطار
(نفق الأزهر)

حلقات خرسانية ذات تجويف بقطر ٨,٣٥ متر
(مترو أنفاق القاهرة)



سلالم خرسانية سابقة الصب (فندق الميريديان)

شكل (٣-٥) بعض التطبيقات المختلفة للخرسانة سابقة الصب .

٣-٥ الخرسانة عالية المقاومة High Strength Concrete

وهى خرسانة ذات مقاومة تزيد عن ٦٠٠كج/سم^{٢} وقد تصل أو تزيد عن ١٤٠٠كج/سم^{٢} ويمكن الحصول عليها باستخدام المواد المحلية المتاحة والتى تستخدم فى صناعة الخرسانة التقليدية (٢٥٠كج/سم^{٢}) من ركام وأسمنت وماء إلا أن الخرسانة عالية المقاومة تحتوى على مادة إضافية أخرى وهى الملدنات Superplasticizers وذلك حتى يمكننا تقليل ماء الخلط إلى أقصى درجة مع الحصول على نفس القابلية للتشغيل وبالتالى الحصول على المقاومة العالية (أنظر البابين الأول والثانى). أما المواد البوزولانية مثل مادة غبار السيليكا Silica fume فقد توجد أولا توجد فى كلٍ من نوعىّ الخرسانة. إن أهم شىء يجب أخذه فى الاعتبار عند إنتاج خرسانة عالية المقاومة هو اختيار مجموعة المواد التى تتجانس مع بعضها لتعطى خرسانة جيدة لها المقاومة و المتانة وكذلك القابلية للتشغيل المطلوبة.

٣-٥-١ الخصائص المطلوب توافرها فى المكونات:

أ- الركام الكبير يجب أن يكون قوى ومتين لأنه يعمل كعامل يحدد مقاومة الخرسانة القصوى حيث أن الشروخ فى حالة الخرسانة عالية المقاومة تمر خلال حبيبات الركام الكبيرة وليس حولها كما فى حالة الخرسانة التقليدية. وقد وجد أن الخرسانة المصنوعة من الصخر (مثل الجرانيت أو الدولوميت) تعطى مقاومة أكبر بحوالى ١٠ إلى ٢٠% من تلك المصنوعة من الزلط.

ب- الركام الصغير أو الرمل يجب أن يكون خشن نوعاً ما حيث يكون معاير النعومة له من ٢,٨ إلى ٣,٠ وذلك لأن الخلطة تكون غنية بالمواد الناعمة مثل الأسمنت وغبار السيليكا إن وجدت.

ج- الأسمنت يجب أن يكون عالي الجودة وأن يكون متوافق مع أي إضافات مستخدمة. ولقد وجد أن النسبة المثلى التى تعطى أكبر مقاومة للخرسانة تقع بين ٤٥٠ إلى ٥٠٠كج/م^{٣} (٩ : ١٠ شكاير). ويعتمد ذلك على خصائص وكميات ونسب باقي المكونات وعما إذا كانت الخلطة تحتوى على مادة غبار السيليكا أم لا.

د- غبار السيليكا Silica fume وهى مادة بوزولانية تتفاعل مع هيدروكسيد الكالسيوم الحر الناتج من تفاعل الأسمنت مع الماء مكونة مركبات غير قابلة للذوبان مثل سيليكات الكالسيوم والتى تعمل على سد الفجوات الداخلية والمسام الشعرية وبالتالى زيادة المقاومة وتحسين النفاذية. وعموماً فإن الزيادة فى مقاومة الضغط بتأثير مادة غبار السيليكا قد لا تتجاوز ٢٠%. وتجدر الإشارة أن النسبة المثلى من غبار السيليكا تتراوح من ١٠ إلى ١٥% من وزن الأسمنت.

هـ- الملدنات Superplasticizers وهى أهم مكون للحصول على خرسانة عالية المقاومة حيث بواسطتها نستطيع خفض نسبة ماء الخلط إلى ٠,٢٥ من وزن الأسمنت فقط وبالتالى يمكننا الحصول على أعلى مقاومة. ويجب عمل تحقيق وتأكد من مدى توافق هذه المادة مع الأسمنت المستخدم.

٣-٥-٢ تطبيقات الخرسانة عالية المقاومة

ظل استخدام الخرسانة عالية المقاومة فترة طويلة محصوراً فى عدة تطبيقـــــــات تقليـدية Classical Applications هدفها الأوحد هو استغلال قيمة المقاومة العالية فى الحصول على أقل مساحة قطاع وأقل حجم للمنشأ وكذلك أقل وزن للمنشأ. ولذلك كانت هذه التطبيقات محددة فى ثلاثة أشياء رئيسية هى:

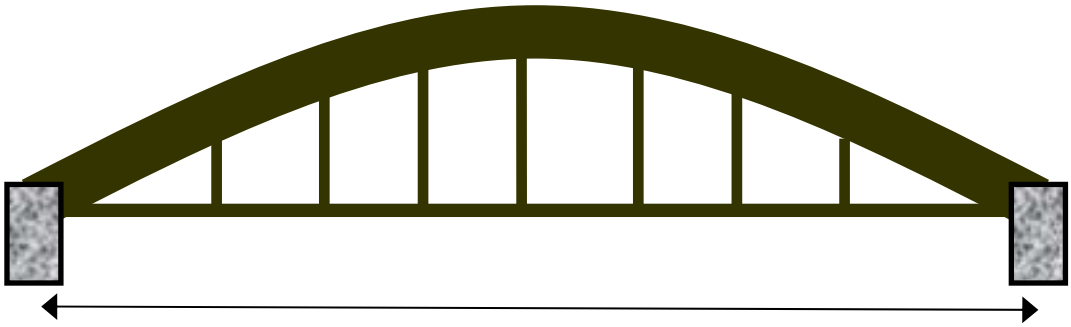
* المباني عالية الارتفاع High Rise Buildings
* الكبارى Bridges
* المنشآت البحرية Offshore Structures

وحديثاً تم استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى تطبيقات أخرى متنوعة (شكل ٣-٦) للاستفادة بطريقة مباشرة أو غير مباشرة من مميزاتها العديدة. وهذه التطبيقات قد تأخذ اسم "تطبيقات غير تقليدية" Non-Classical Applications ومن هذه التطبيقات:

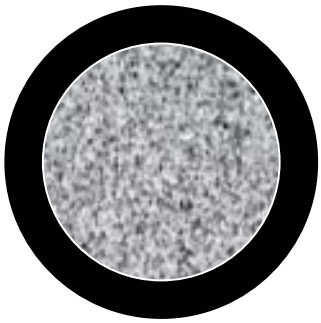
* الحصول على مقاومة مبكرة عالية High Early Strength
* إعادة إحياء العناصر الإنشائية القديمة مثل الأرش Arch Girder
* استخدامها مع قطاعات الحديد لزيادة جساءة المنشأ Improving Stiffness
* عمل خوازيق لولبية لتنفيذها بدون إهتزازت أو ضوضاء Screwing Piles
* محطات الطاقة النووية Nuclear Power Plants
* الأنابيب الخرسانية تحت الأرض Underground Concrete Pipes
* الأرصفة والطرق Pavements

ملحوظة :

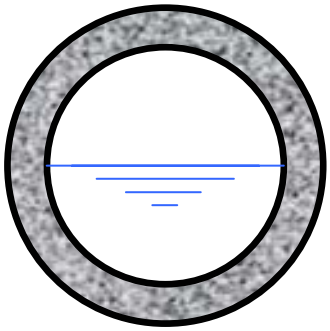
ينبغي أن نفرق بين الخرسانة عالية المقاومة High Strength Concrete والخرسانة عالية الأداء High Performance Concrete فالخرسانة عالية الأداء هى الخرسانة التى لها صفات وخصائص معينة تسمح لها بالعمل فى وسط محدد وفى ظروف معينة. والخصائص التى تميز الخرسانة عالية الأداء عن الخرسانات الأخرى قد تتضمن بعض خصائص الخرسانة الطازجة مثل القابلية للتشغيل أو القوام أو قد تتضمن بعض خصائص الخرسانة المتصلدة مثل مقاومة البرى والخدش أو المقاومة للصقيع أو المقاومة للانكماش. وهذه الخصائص قد تكون منفصلة أو مجتمعة بحيث تعطى خرسانة لها أداء مختلف عن أداء الخرسانة التقليدية المعتادة. والخرسانة عالية الأداء لا يشترط فيها أن تكون عالية المقاومة.



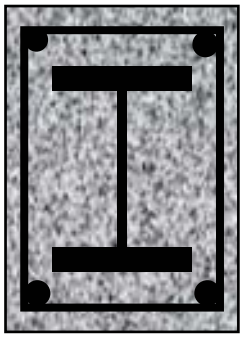
أرش Arch Girder



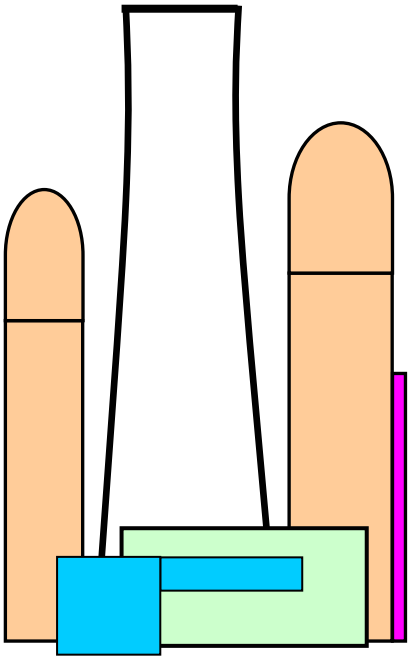
الأنابيب المعدنية المملوءة بالخرسانة



أنابيب المياه تحت الأرض



القطاعات المركبة



محطات الطاقة النووية

شكل (٣-٦) بعضاً من التطبيقات غير التقليدية للخرسانة عالية المقاومة.

٣-٥-٣ الجدوى من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى مصر

إن الخرسانة عالية المقاومة تحتاج إلى تكلفة أكثر نتيجة استخدام مواد ذات جودة عالية وكذلك ثمناً للإضافات المستخدمة وأيضاً لضبط الجودة العالي. وبالرغم من ذلك فقد ثبت عملياً أن استخدام الخرسانة عالية المقاومة يكون له عائد إقتصادى أو عائد فنى كبير بالمقارنة بالخرسانات التقليدية الأخرى. ولقد تم دراسة هذه النقطة فى عدة أبحاث تختص بدراسة الجدوى من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى الأعمدة والكمرات وذلك تحت الظروف والأسعار الموجودة فى مصر. ومن الأبحاث التى تناولت هذه النقطة بالتحليل الأبحاث رقم ٢٧ ، ٢٨ ، ٢٩ بقائمة المراجع. وفيما يلي عرض موجز لأهم النتائج فى هذا الصدد.

أولاً العناصر المعرضة لقوى ضغط مثل الأعمدة

إن الجدوى من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى العناصر المعرضة لقوى ضغط مثل الأعمدة تكون أقصى ما يمكن حيث يمكن الاستفادة من ذلك اقتصاديا (بتوفير التكاليف) وفنياً (بعمل تخفيض فى المساحات والمقاطع) ويمكن تلخيص ذلك فى النقاط الآتية:

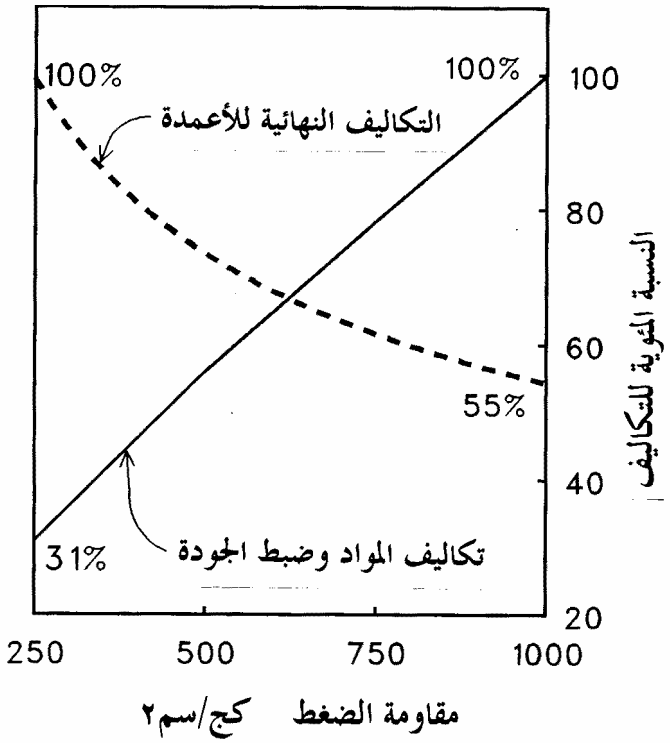
١- **على الرغم من زيادة تكاليف المتر المكعب من الخرسانة عالية المقاومة وكذلك زيادة تكاليف ضبط الجودة إلا أن التكاليف النهائية للعمود تقل كثيراً. فباستخدام خرسانة مقاومتها للضغط ١٠٠٠ كج/سم^{٢} فإن التكاليف النهائية للأعمدة تصل إلى حوالى ٥٥% فقط من التكاليف فى حالة استخدام خرسانة ذات مقاومة للضغط ٢٥٠ كج/سم^{٢} كما هو مبين بشكل (٣-٧).**

٢- **مساحة القطاع الخرسانى للأعمدة المعرضة إلى حمل ضغط محوري تقل إلى ما يقرب من ٥٤% و ٣٧% نتيجة استخدام خرسانة ذات مقاومة للضغط تساوى ٥٠٠ كج/سم^{٢} و ٧٥٠ كج/سم٢ بدلاً من ٢٥٠ كج/سم^{٢} على الترتيب (أنظر شكل ٣-٨ ، شكل ٣-٩).**

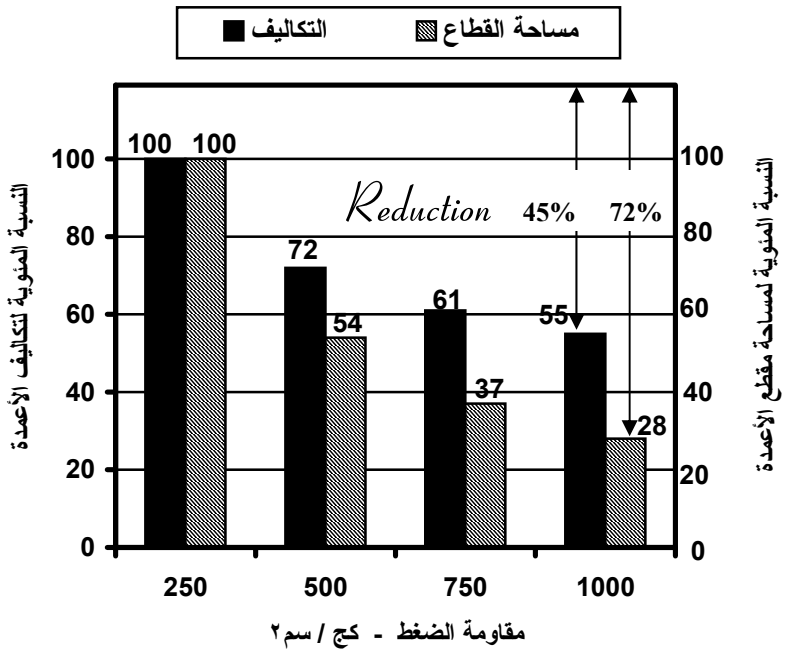
٣- **أثبتت الدراسات التحليلية أنه بالنسبة لعمود ذو مقطع ثابت و معرض إلى حمل ضغط محوري فإن هناك انخفاض فى نسبة حديد التسليح مقداره ٢,٢% لكل ١٠٠ كج/سم^{٢} زيادة فى مقاومة الضغط للخرسانة.**

٤- **إن الانخفاض الملحوظ فى أبعاد القطاع الخرسانى (خاصة فى الطوابق السفلى) ذو أهمية خاصة لخدمة الأغراض المعمارية وزيادة المساحة المستغلة (شكل ٣-٩).**

٥- **ثبات القطاع الخرسانى مع زيادة المقاومة يسمح بزيادة عدد الطوابق للمنشأ نفسه.**

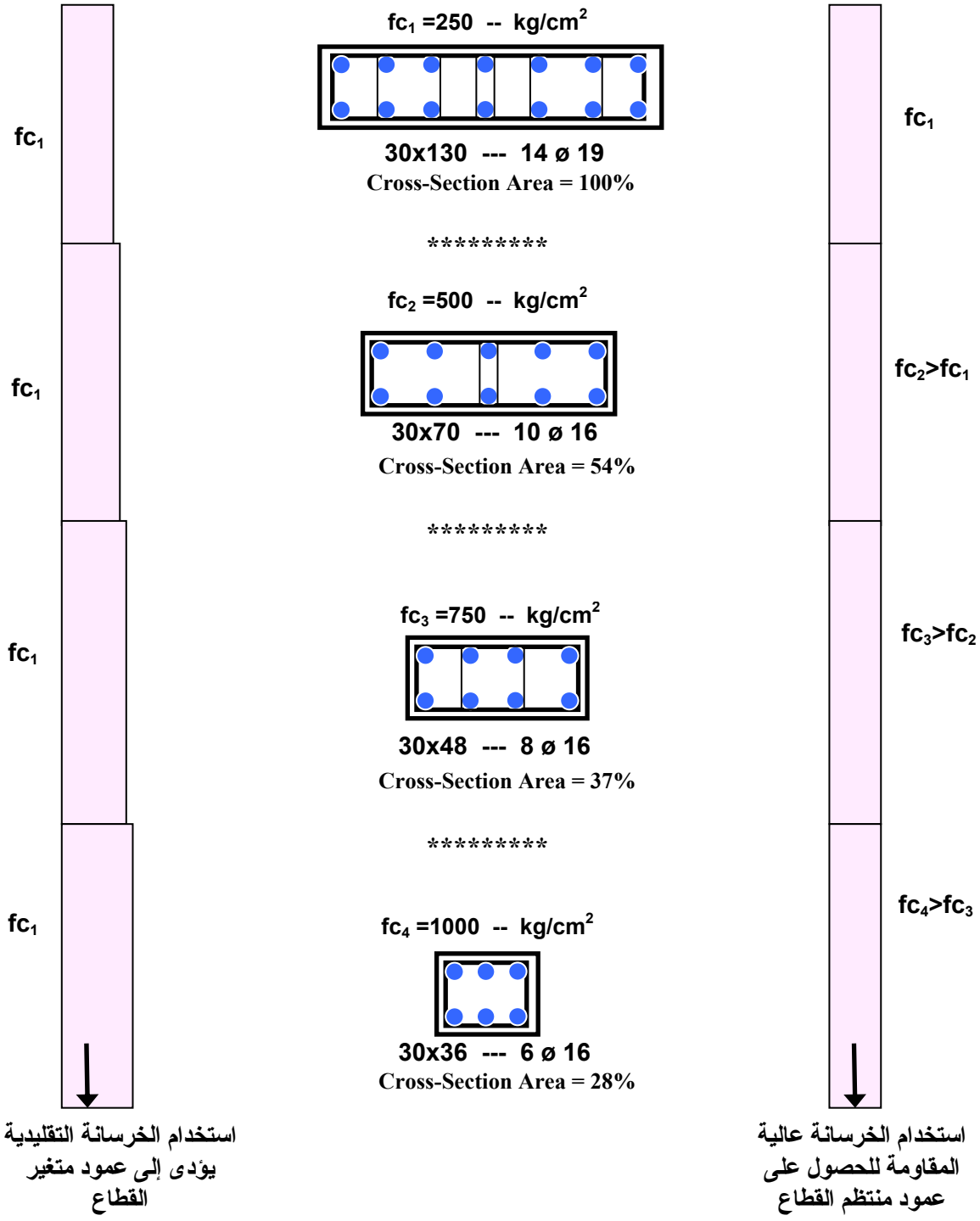


شكل (٣–٧) اقتصاديات الخرسانة عالية المقاومة فى الأعمدة.



شكل (٣–٨) انخفاض أبعاد القطاع الخرسانى فى الأعمدة.

❑ **المثال الآتى يوضح مدى الفوائد من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى تقليل قطاعات الأعمدة وكذلك تقليل كمية حديد التسليح المستخدمة. نفترض أن هناك عمود قصير يؤثر عليه حمل ضغط محوري مقداره ٤٠٠ طن والمطلوب تصميم قطاع العمود باستخدام خرسانات ذات مقاومة للضغط مقدارها ٢٥٠ ، ٥٠٠ ، ٧٥٠ ، ١٠٠٠ كج/سم^2 إذا علم أن مقاومة الخضوع للحديد تساوى ٢٤٠٠ كج/سم^2 وأن نسبة الحديد فى القطاع تساوى ١%.**



شكل (٣-٩) تأثير الخرسانة عالية المقاومة فى تقليل قطاعات الأعمدة.

ثانياً العناصر المعرضة لعزوم إنحناء مثل الكمرات

إن استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى العناصر المعرضة لعزوم إنحناء مثل الكمرات لا ينتج عنه خفض كبير فى التكاليف كما فى حالة الأعمدة وإنما تكون الاستفادة فى هذه الحالة من الناحية الفنية أكثر من الناحية الاقتصادية. ويمكن تلخيص ذلك فى النقاط الآتية:

١- الاستفادة الاقتصادية من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى الكمرات تتحقق فقط عندما يتم تقليل عرض القطاع مع ثبات العمق وثبات نسبة حديد التسليح فى القطاع. فقد وجد أنه بزيادة مقاومة الضغط ثلاثة مرات فإن عرض القطاع يمكن أن يقل إلى حوالى الثلث كما تقل التكاليف النهائية بنسبة ١٤%.

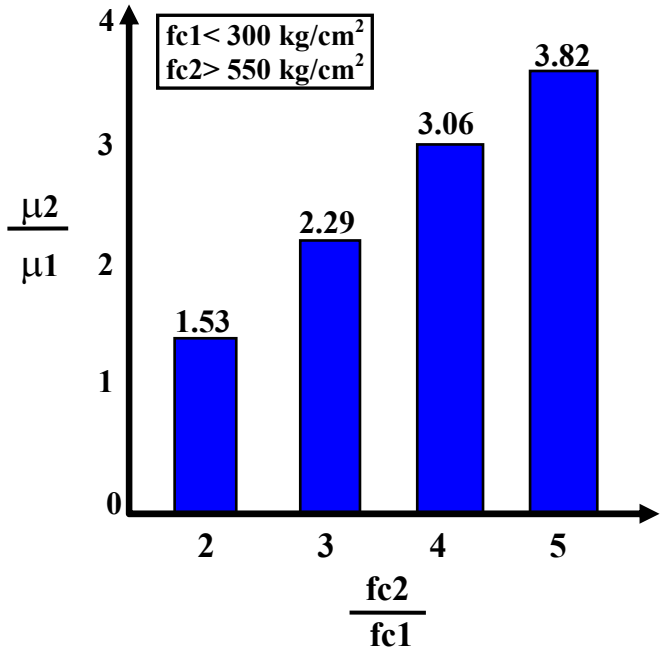
٢- إن استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى الكمرات يستلزم زيادة نسبة الحديد الرئيسي حتى نتجنب حدوث انفعال زائد فى الحديد وبالتالى نتجنب حدوث شروخ أكثر وأوسع. ولقد وجد أنه عند زيادة مقاومة الخرسانة إلى الضعف فإن حديد التسليح ينبغي زيادته بنسبة ٥٣% كما هو واضح بشكل (٣-١٠) ، وذلك حتى نحصل على نفس قيمة الانفعال فى حديد التسليح.

٣- تتحقق الجدوى الفنية من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى الكمرات وذلك بتقليل عمق القطاع وزيادة نسبة حديد التسليح. فقد وجد أنه عند زيادة مقاومة الضغط للخرسانة ثلاثة مرات فإن عمق القطاع يمكن أن يقل إلى حوالى ٦٤% من العمق الأصلي (شكل ٣-١١) ولكن نسبة الحديد تزيد وتصل إلى حوالى ٢٢٩% من النسبة الأصلية. وعليه فإن التكاليف تزيد بنسبة ٤٢%.

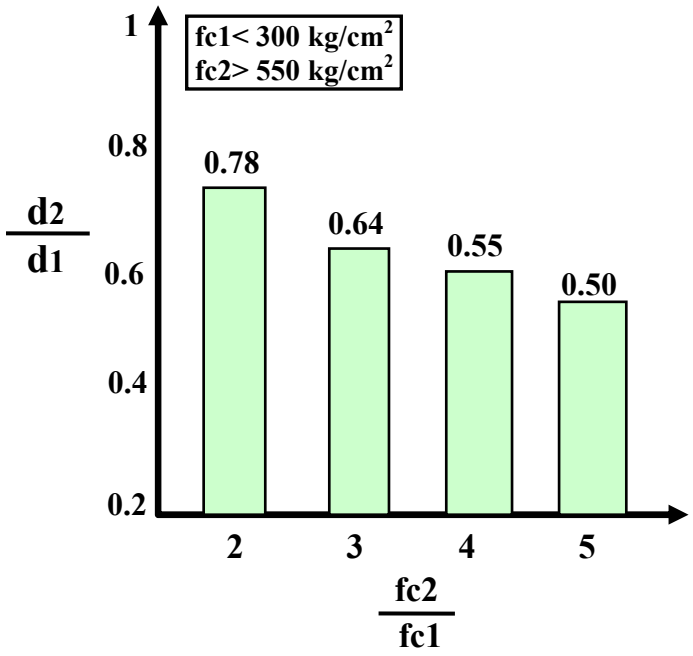
٤- أيضاً تتحقق الجدوى الفنية من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى الكمرات وذلك بزيادة بحر الكمرة عند ثبات الحمل المؤثر وثبات القطاع الخرسانى. فقد وجد أنه يمكن زيادة بحر الكمرة إلى ١,٨ مرة عندما تزيد مقاومة الضغط للخرسانة ٤ مرات.

٥- شكل (٣-١٢) يوضح تحقيق الجدوى الفنية من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى الكمرات من خلال زيادة السعة التحميلية للكمرة عند ثبات القطاع وزيادة نسبة حديد التسليح. فنجد أنه بزيادة مقاومة الضغط للخرسانة أربع مرات فإن السعة التحميلية لها تتضاعف ٣,٢٤ مرة.

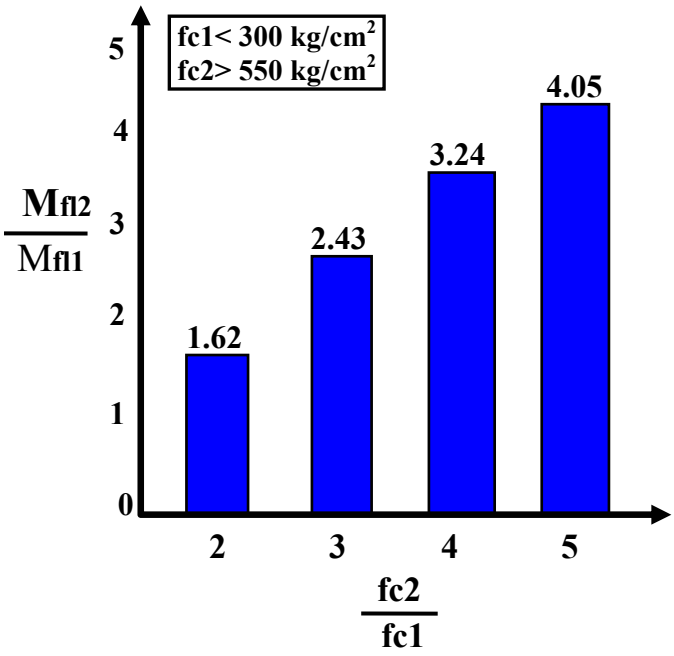
٦- يمكن إجراء تخفيض جزئي لكلٍ من عرض وعمق القطاع فى آن واحد كما هو مبين بشكل (٣-١٣) وذلك حتى يتم إسيفاء شروط التشغيل المختلفة.



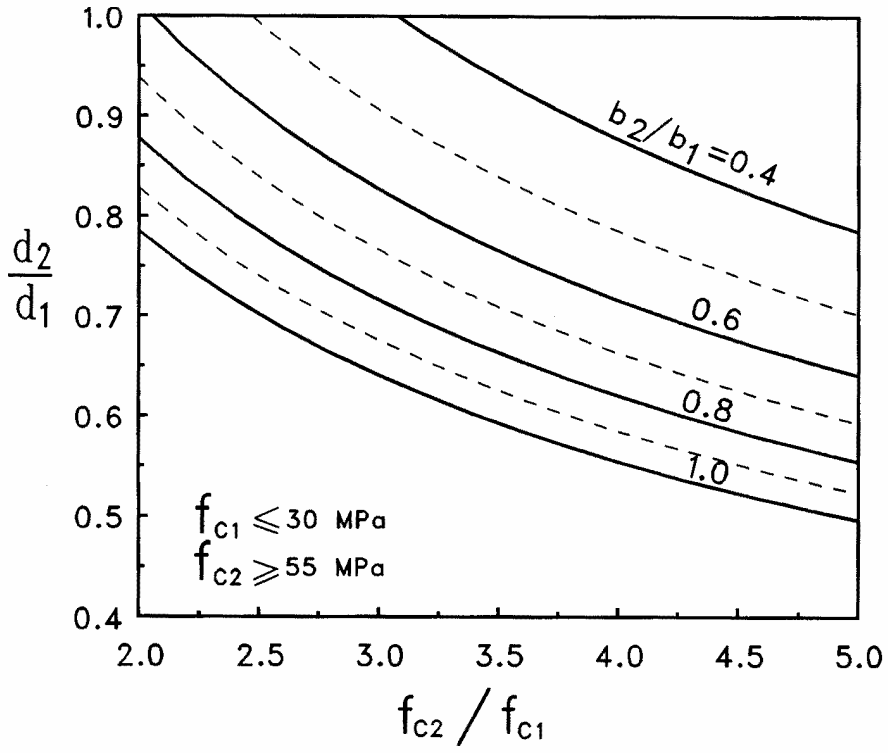
شكل (٣-١٠) تأثير الخرسانة عالية المقاومة على نسبة الحديد الرئيسي فى الكمرات.



شكل (٣-١١) تأثير الخرسانة عالية المقاومة فى تقليل عمق القطاع فى الكمرات.



شكل (٣-١٢) تأثير الخرسانة عالية المقاومة على السعة التحميلية للكمرات.



شكل (٣-١٣) تأثير الخرسانة عالية المقاومة على كلٍ من عرض وعمق القطاع فى الكمرات.

٣-٥-٤ المميزات العامة للخرسانة عالية المقاومة:

١- مقاومة الضغط فيها من ٦٠٠ إلى ١٤٠٠ كج/سم^{٢} (٥-٧ مرات مقاومة الخرسانة التقليدية).

٢- معاير المرونة يساوى تقريبا مرتين إلى مرتين ونصف معاير المرونة للخرسانة التقليدية مما يساعد فى تقليل الترخيم Deflection والتشكل Deformation.

٣- تمتاز بمتانة عالية Durability ومقاومة للاحتكاك ومقاومة للكيماويات.

٤- الفوائد الناتجة منها (مثل تقليل القطاعات وزيادة الأبحر وتقليل الوزن) أكثر من الزيادة فى تكاليف إنتاجها.

٥- تعطى مقاومة عالية بالنسبة لوحدة الثمن - وبالنسبة لوحدة الحجوم - وبالنسبة لوحدة الوزن Strength / unit weight - Strength / unit volume – Strength / unit Cost

ويمكن توضـيح النقطة السابقة كما يلي:

- مقاومة عالية بالنسبة لوحدة الثمن

خرسانة ذات مقاومة ٢٠٠ كج/سم^{٢} تتكلف مثلاً ٢٠٠ جنيه/م^{٣} يعنى ١,٠ كج/سم^{٢}/جنيه.
بينما خرسانة ذات مقاومة ٦٠٠ كج/سم^{٢} تتكلف ٣٠٠ جنيه/م^{٣} أى ٢,٠ كج/سم^{٢}/جنيه.

- مقاومة عالية بالنسبة لوحدة الحجوم

قاعدة عمود من خرسانة مقاومتها ٢٠٠ كج/سم^{٢} يكون حجمها حوالى ٤م^{٣} يعنى ٥٠ كج/سم^{٢}/م^{٣}.
بينما قاعدة من خرسانة مقاومتها ٦٠٠ كج/سم^{٢} يكون حجمها حوالى ٢م^{٣} يعنى ٣٠٠ كج/سم^{٢}/م^{٣}.

- مقاومة عالية بالنسبة لوحدة الوزن

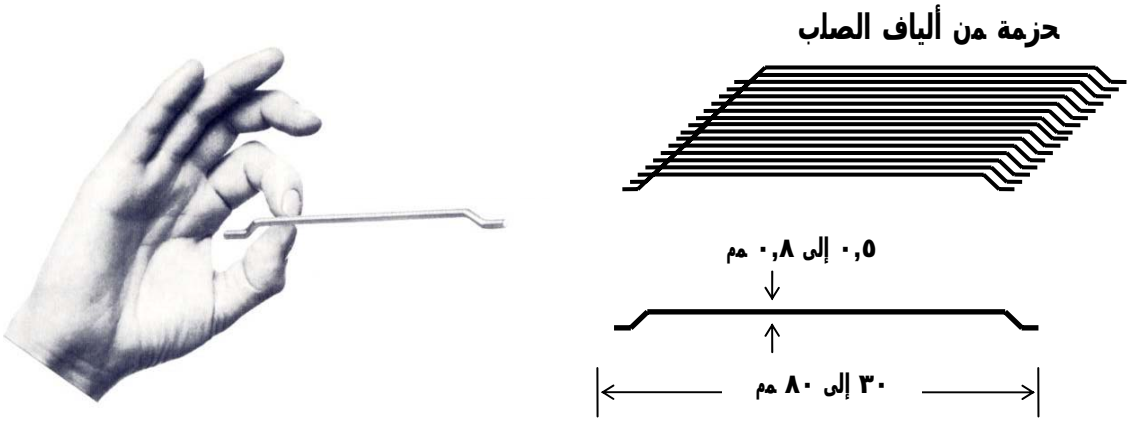
عمود من خرسانة ذات مقاومة ٢٠٠ كج/سم^{٢} يكون وزنة حوالى ٤ طن يعنى ٥٠ كج/سم^{٢}/طن.
بينما عمود من خرسانة مقاومتها ٦٠٠ كج/سم^{٢} يكون وزنة حوالى ٣ طن أي ٢٠٠ كج/سم^{٢}/طن.

ومن عيوب الخرسانة عالية المقاومة أنها أكثر قصافة Brittleness من الخرسانة التقليدية والانهيار بها مفاجئ حيث يكون الكسر فيها خلال الركام الكبير وليس حوله كما فى الخرسانة التقليدية ويمكن التغلب على هذه المشكلة بطرق عديدة منها استخدام الألياف مع الخرسانة. كذلك فإن استخدام الخرسانة عالية المقاومة يتطلب درجة عالية من ضبط الجودة والتحكم فيها.

٣-٦ الخرسانة الليفية Fiber Concrete

وهى الخرسانة المصنوعة من الأسمنت والركام و المحتوية على ألياف غير مستمرة و موزعة توزيعاً عشوائياً فى جميع الاتجاهات خلال الكتلة الخرسانية وتنقسم الألياف إلى قسمين رئيسيين من حيث النوع:

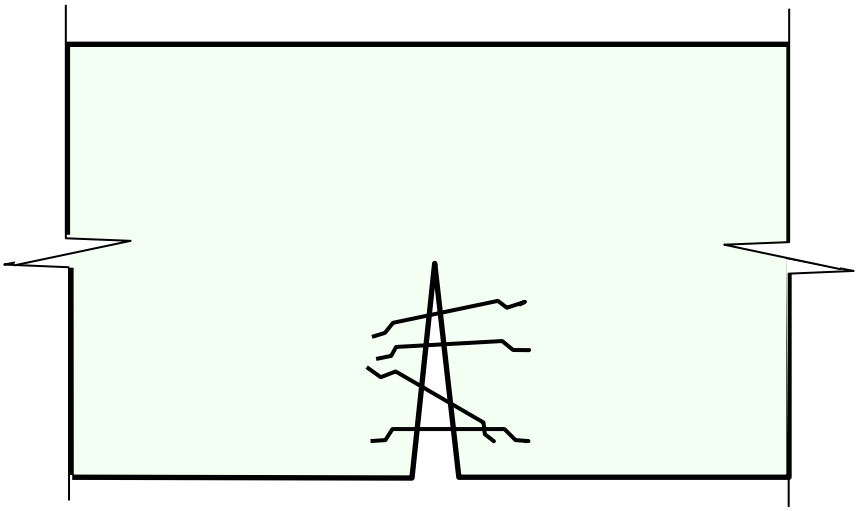
- ألياف الصلب وهى قطع من الصلب بطول ٣ إلى ٨سم وقطر من ٠,٥ إلى ٠,٨ مم كما بالشكل (٣-١٤).
- والألياف الصناعية مثل ألياف البولى بروبلين والبوليستر والبوليثيلين والأكريلك وتأخذ نفس شكل ألياف الصلب ولكنها مصنعة من مواد صناعية.



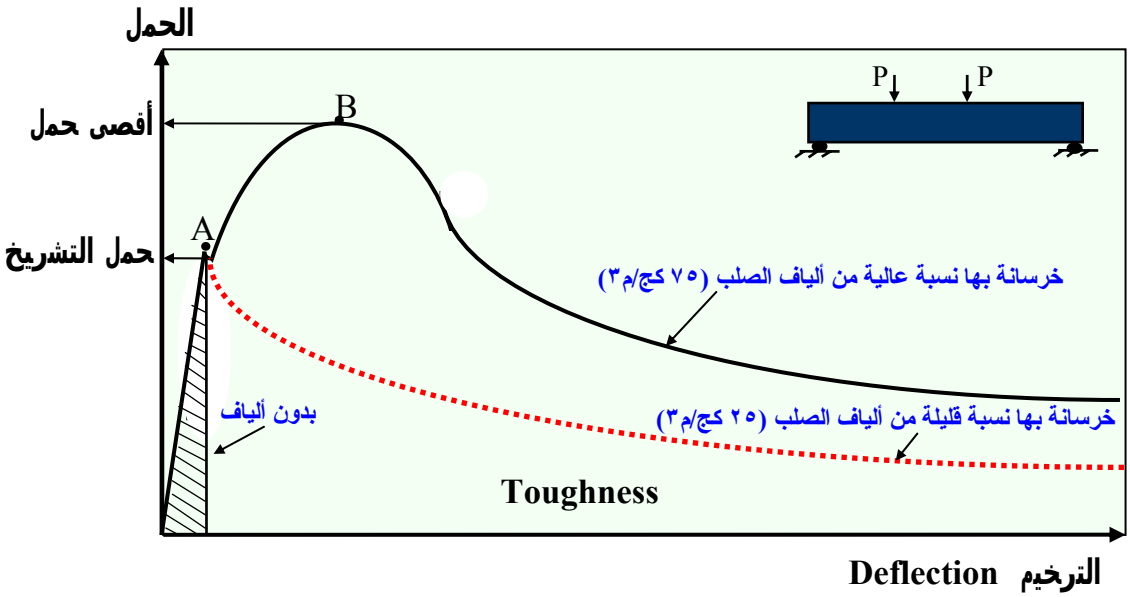
شكل (٣-١٤) ألياف صلب غير مستقيمة الأطراف.

والألياف لها القدرة على تحسين مقاومة الخرسانة فى القص والشد والانحناء والصدم والانكماش. كما أنها تعمل على تقليل اتساع الشروخ وإعادة توزيعها كما يتضح ذلك من الرسم الكروكى بشكل (٣-١٥)، ولكن الألياف لا تؤثر بدرجة كبيرة على مقاومة الضغط. وأهم وظيفة للألياف أنها تزيد من قيمة معاير المتانة للمادة زيادة كبيرة جداً. شكل (٣-١٦) يوضح منحنى الحمل والتشكل للخرسانة الليفية ومدى زيادة المتانة Toughness فى الخرسانة الليفية. وبالتالى فهي تحول ميكانيكية الكسر فى الخرسانة من كسر قصف مفاجئ وخطر Dangerous Sudden Failure إلى كسر غير قصف وتدريجي Ductile Failure. شكل (٣-١٧) يوضح مقارنة بين كمرتين متشابهتين من الخرسانة المسلحة (بدون كانات) أحدهما بدون ألياف والأخرى تحتوى على ألياف. ويتضح التأثير الكبير والفعال للألياف فى مقاومة قوى القص وزيادة معاير المتانة Toughness. وتستخدم الخرسانة الليفية على نطاق واسع فى الطرق والمطارات والمنشآت العسكرية وقواعد الماكينات. كما تستخدم فى الأسقف القشرية ومناطق

الاتصال بين الكمرة والعمود فى الإطارات. وتستخدم الألياف أيضاً فى المواسير الخرسانية والوحدات سابقة الصب و فى العناصر الخرسانية المعرضة لقوى القص والصدم. وبالرغم من أن الألياف تزيد من مقاومة قوى الشد فى الانحناء إلا أن هذه الزيادة غير جديرة بالاعتبار وبالتالى فإنه ليس من الحكمة أن تستخدم الألياف كبديل كلى أو إستعواضى لأسياخ صلب التسليح.



شكل (٣-١٥) دور الألياف فى تقليل اتساع الشروخ وإعادة توزيعها .



شكل (٣-١٦) منحنى الحمل والتشكل للخرسانة الليفية.

شكل (٣-١٧) تأثير الألياف الفعال فى مقاومة قوى القص وزيادة المتانة.

٣-٧ الخرسانة ذاتية الدمك Self-Compacting Concrete

٣-٧-١ تعريف :

الخرسانة ذاتية الدمك هى الخرسانة التى لها درجة عالية من السيولة والإنسياب Deformability كما أن لها مقاومة عالية للإنفصال الحبيبى Stability ويمكن صبها بنجاح فى القطاعات الضيقة والمزدحمة بحديد التسليح Filling Capacity وذلك بدون الإستعانة بأى وسيلة دمك خارجية.

وتعتبر الخرسانة ذاتية الدمك نتاج التقدم التكنولوجي فى مجال إضافات الخرسانة حيث تعتبر كل من إضافات تحسين اللزوجة وإضافات تقليل ماء الخلط (الملدنات الفائقة) هما العنصرين الأساسيين اللازمين لإنتاج هذه الخرسانة. ويعتبر اليابانيون هم رواد صناعة هذه الخرسانة حيث قاموا فى السنوات العشر الأخيرة باستخدامها فى منشآت وتطبيقات عديدة ومفيدة. بعد ذلك تم إنتاج هذه الخرسانة فى العديد من الدول مثل تركيا وأمريكا. وفى مصر تم حديثاً إجراء بعض الأبحاث فى جامعة المنصورة لإنتاج الخرسانة ذاتية الدمك باستخدام المواد المحلية كما تم دراسة المتطلبات الخاصة للقابلية للتشغيل وكذلك الاختبارات الخاصة والضرورية لهذه الخرسانة. وبصفة عامة فلقد أظهرت نتائج الاختبارات إمكانية صناعة الخرسانة ذاتية الدمك بالمواد المحلية المتاحة فى مصر بدرجة نجاح عالية. والبحث رقم ٣٨ بقائمة المراجع يختص بهذا الموضوع.

٣-٧-٢ الخواص المطلوب تحقيقها فى الخرسانة ذاتية الدمك:

أولاً: درجة إنسياب وسيولة عالية High Deformability

ويتحقق ذلك بالآتي:

١- زيادة سيولة العجينة --- باستخدام الملدنات الفائقة و/أو استخدام نسبة عالية من ماء الخلط.

٢- تقليل الاحتكاك الداخلي بين الحبيبات --- بتقليل نسبة الركام الكبير فى الخلطة و/أو استخدام نسبة من البودرة الناعمة المتدرجة.

ثانياً: درجة مقاومة عالية للإنفصال الحبيبى Good Stability

ويتحقق ذلك بالآتي:

١- تقليل الانفصال بين المواد الصلبة فى الخلطة عن طريق --- تقليل المقاس الإعتبارى الأكبر للركام و/أو تقليل نسبة الركام و/أو استخدام إضافات تحسين اللزوجة و/أو تقليل نسبة ماء الخلط.

٢- تقليل النضح (الماء الحر) إلى أقل درجة ممكنة عن طريق --- استخدام نسبة أقل من ماء الخلط و/أو استخدام بودرة ذات مساحة سطحية عالية و/أو زيادة نسبة إضافات تحسين اللزوجة.

ثالثاً: لها قدرة عالية على الصب والملء فى القطاعات الضيقة أو المزدحمة بحديد التسليح وذلك تحت تأثير وزنها وبدون حدوث إنسداد أو توقف للخرسانة Blockage

ويتحقق ذلك بالآتي:

١- أن يكون لها مقاومة عالية للانفصال الحبيبي أثناء صب وتدفق الخرسانة عن طريق --- استخدام إضافات تحسين اللزوجة و/أو تقليل نسبة ماء الخلط.

٢- التوافق بين مقاس القطاعات والمسافة بين الأسياخ من ناحية ومقاس الركام الكبير ونسبته فى الخلطة من ناحية أخرى وذلك عن طريق --- تقليل المقاس الإعتبارى الأكبر للركام و/أو تقليل نسبة الركام فى الخلطة.

٣-٧-٣ مميزات الخرسانة ذاتية الدمك:

١- سهولة الصب فى القطاعات المزدحمة بحديد التسليح والقطاعات الضيقة.

٢- القدرة على صب كمية كبيرة من الخرسانة فى فترة زمنية قصيرة.

٣- تحتاج عمالة أقل.

٤- لا يوجد بها إنفصال حبيبى.

٥- لا تحتاج إلى إستخدام هزازات فى الموقع مما يؤدى إلى سهولة الصب والتغلب على مشكلة الضوضاء الناتجة عن الهزازات.

٦- لها شكل ومظهر أفضل كما أنها لا تحتاج إلى تسوية سطحها بعد صبها .

٧- لا تعطى فرصة للتدخل فى الموقع لإضافة ماء للخلطة نظراً لسيولتها.

٨- أكثر معمرية من الخرسانة التقليدية.

٣-٧-٤ الاختبارات المطلوبة والغرض منها:

وتجدر الإشارة أنة بالنسبة للخرسانة ذاتية الدمك فإن تحقيق متطلبات وخواص الخرسانة الطازجة يكون له الأولية إذا قورن بمتطلبات وخواص الخرسانة المتصلدة حيث تعتبر المرحلة الطازجة هنا هى الغاية المنشودة ومن ثمّ توجد إختبارات خاصة لقياس خواص المرحلة الطازجة من الخرسانة ذاتية الدمك وفيما يلى نبذة مختصرة وسريعة عن بعض هذه الإختبارات:

١- إختبار الإنسياب الحر Slump Flow

وذلك لقياس الإنسياب الحر فى حالة عدم وجود عوائق فى طريق الخرسانة. ويستخدم فى ذلك جهاز مخروط الهبوط التقليدى الموضح فى الباب السابع من هذا الكتاب. ويلزم أن يكون قطر الإنسياب فى حدود من ٦٠ إلى ٧٠سم.

٢- إختبار إنسياب الخرسانة فى القمع V-Funnel Test

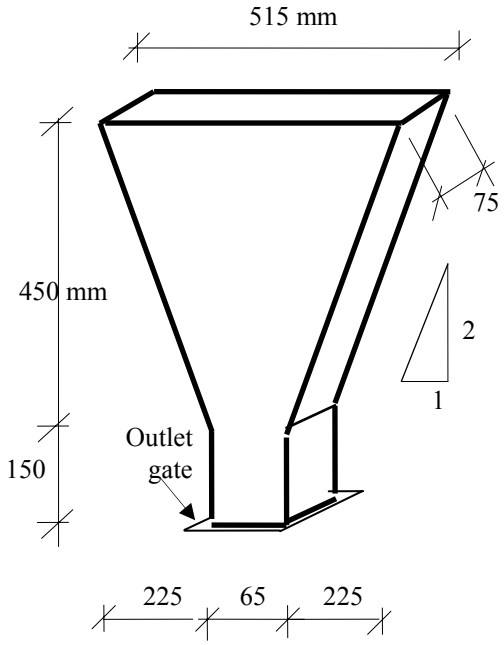
ويقيس قدرة الخرسانة على تغيير مسارها والإنتشار خلال منطقة ضيقة بدون حدوث إنسداد أو توقف. ويستحدم لذلك الجهاز الموضح بشكل (٣-١٨) حيث يتم قياس زمن مرور الخرسانة بالكامل فى القمع ، وهذا الزمن يجب أن لا يتجاوز عشر ثوان.

٣- إختبار القدرة على الصب والملء Filling Capacity

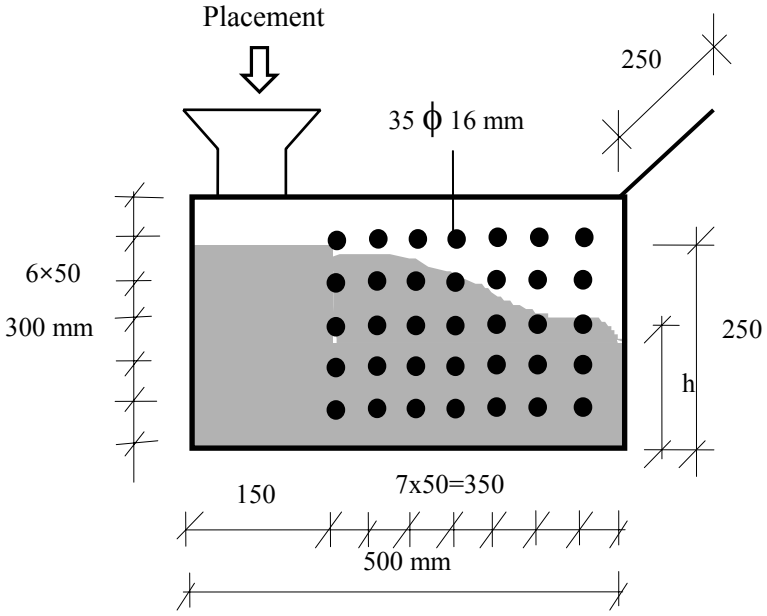
وذلك لقياس قدرة الخرسانة على الصب والتدفق فى وجود منطقة مزدحمة بحديد التسليح دون حدوث توقف أو إنسداد للخرسانة. ويستخدم فى ذلك جهاز خاص كما هو مبين بشكل (٣-١٩) حيث يتم قياس النسبة المئوية للخرسانة التى تملء الصندوق والتى ينبغى أن لاتقل عن ٨٠%.

٤- رصد الهبوط فى سطح الخرسانة Surface Settlement

وذلك لقياس الثبات فى الخرسانة بعد الصب وحتى حدوث التصلب. حيث ينبغى بقاء الركام معلق فى العجينة دون حدوث هبوط. وتستخدم أجهزة القياس الميكانيكية للتحكم فى رصد الحركة النسبية لسطح الخرسانة.



شكل (٣–١٨) الجهاز المستخدم فى إختبار إنسياب الخرسانة فى القمع V-Funnel Test



شكل (٣–١٩) الجهاز المستخدم فى إختبار القدرة على الصب والملء Filling Capacity Test

٣-٨ الخرسانة المقذوفة (خرسانة الرش) Shotcrete

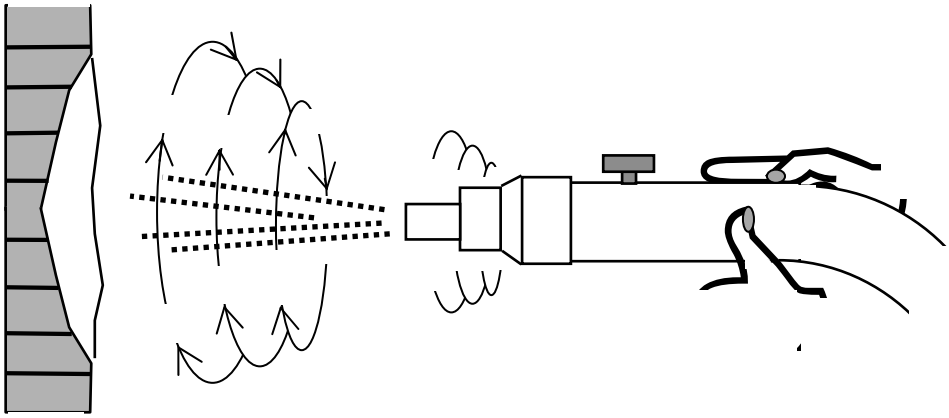
هى خرسانة (أو مونة) تقذف بضغط الهواء من فوهة القاذف بسرعة عالية إلى السطح المراد تغطيته بالخرسانة. وتستخدم غالبا فى أعمال الإصلاحات والترميم Repair وتبطين الأنفاق Tunnels وتبطين الترع وفى كثير من الأحوال التى يصعب فيها إستخدام الطرق التقليدية فى الصب فمثلاً عندما يكون مطلوب صب طبقات غير سميكة أو متغيرة السمك أو عندما يصعب الوصول إلى منطقة العمل أو عندما يكون إستخدام الشدات صعباً أو مكلفاً. كما تستخدم الخرسانة المقذوفة فى إصلاح الخرسانة المتداعية فى الكبارى والأهوسة والسدود والمنشآت المواجهة للمياه وكذلك مبانى الطوب المتآكلة. كما تستخدم فى تبطين الأفران بكافة أنواعها.

ويوجد نوعين رئيسيين لطريقة تنفيذ الخلطة ، أسلوب الخلط الجاف وأسلوب الخلط المبتل. ففى الطريقة الجافة يتم خلط الركام و الأسمنت وأى مكونات أخرى على الجاف أولاً وتدفع بإستخدام ضغط الهواء خلال القاذف ثم يضاف الماء عند فوهة القاذف ويدفع الجميع إلى السطح المراد صبه. أما فى الطريقة الرطبة فيتم خلط جميع المكونات بما فيها الماء خلطاً جيداً أولاً (ماعدا معجلات الشك إن وجدت) ويدفع الجميع بإستخدام ضغط الهواء خلال القاذف إلى السطح المراد قذفه. وفى جميع الأحوال يلزم إعداد السطح المقذوف عليه الخرسانة لضمان جودة ترابطها معه. ويمكن القول أن خواص وسلوك الخرسانة المقذوفة يعتمد كثيراً على صفات المعدات المستخدمة وعلى مهارة القائمين بها كما يعتمد على الظروف التى يتم بها الصب.

و تتميز خلطة الخرسانة المقذوفة بإحتوائها على محتوى أسمنت أعلى لتعويض نسبة الفقد منه عند الإرتداد من السطح. كذلك فإن ركامها يتميز بصغر المقاس حيث يفضل أن لايزيد عن ١٢ مم. كما أنها قد تحتوى على إضافات معينة (ماعدا المؤجلات Retarders) لتحسين بعض الخواص المرغوبة وغالباً فإن الخرسانة المقذوفة تحتوى على المعجلات Accelerators وذلك لتسريع عملية الشك للخرسانة المقذوفة. ويفضل أن تكون فوهة القاذف عمودية على السطح المقذوف ولا تتعدى زاوية ميل القاذف على السطح ٤٥ درجة وذلك لضمان التوزيع المنتظم للخرسانة ولتجنب حدوث تكور و دحرجة للخرسانة على السطح مما يؤدى إلى سطح متعرج غير منتظم. كما يفضل أن تكون المسافة بين فوهة القاذف والسطح فى حدود ٠,٦ إلى ١,٨ متر. شكل (٣-٢٠) ، شكل (٣-٢١) يوضحان إستخدام الخرسانة المقذوفة و التحكم فى القاذف.

ويعيب هذه الخرسانة تعرضها للإنكماش بقيمة كبيرة نتيجة لكثرة كمية الماء بها وكذلك زيادة محتوى الأسمنت مع نقص الركام الكبير. كما يعيب هذه الخرسانة أيضاً إحتمال عدم الإلتصاق والتماسك التام بمادة السطح الذى ترش فوقة وللتغلب على مشكلة الإنكماش يمكن إستخدام الألياف مع هذه الخرسانة والتى أثبتت نجاحاً كبيراً فى الوقت الحال.

شكل (٣-٢٠) صورة توضح إستخدام الخرسانة المقذوفة فى أحد الأنفاق.



حركة دورانية خفيفة فى فوهة الدفع لإنتاج خرسانة مقذوفة جيدة

شكل (٣-٢١) كروكى يوضح طريقة قذف الخرسانة والتحكم فى فوهة الدفع.

٣-٩ الخرسانة البوليمرية Polymer-Concrete

البوليمر أو الراتنج هو إسم لمادة عضوية تتكون من العديد من الجزيئات المتشابهة ذات الوزن الجزيئى المرتفع والجزئ الواحد من هذه الجزيئات يسمى مونومر.

أما الخرسانة الراتنجية فهى خرسانة خاصة يتم الحصول عليها بمعاملة الخرسانة العادية بمواد البوليمر التى تعمل كمواد لاحمة أومالئة للفراغات بين حبيبات الركام. وتمثل المواد البوليمرية حوالى ٦ إلى ١٥% من وزن الخرسانة ومن أمثلتها مواد أو مركبات البوليستر Polyester و الأيبوكسى Epoxy وقد تصل تكاليف خرسانة البوليمرز حوالى من ٢ - ٣ مرات تكاليف الخرسانة العادية وتمتاز بالآتى:

- مقاومة عالية للعوامل الخارجية مثل مقاومة التآكل ونفاذ الماء والمقاومة للكبريتات.
- مقاومة عالية جداً للإنكماش.
- مقاومة ضغط عالية قد تصل إلى ١٢٠٠ كج/سم^{٢}
- مقاومة شد تصل إلى ١٠٠ كج/سم^{٢}

وعموماً يوجد ثلاثة أنواع رئيسية من الخرسانة المحتوية على راتنجات:

١- الخرسانة البلاستيكية	(PC)	Plastic Concrete
٢- الخرسانة البوليمرية الأسمنتية	(PCC)	Polymer Cement Concrete
٣- الخرسانةالأسمنتية المحقونة بالبوليمرات	(PIC)	Polymer Impregnated Concrete

٣-٩-١ الخرسانة البلاستيكية PC

وفيها تحل الراتنجات محل الأسمنت كمادة رابطه لجزيئات الركام. أى أنها عبارة عن ركام متماسك مع بعضه بواسطة مادة رابطة من البوليمرات. والخرسانة البلاستيكية لها خواص ميكانيكية عالية وزمن معالجتها قصير ولها إنكماش متناهى فى الصغر ومقاومة عالية للكيماويات وتتوقف الخواص على نوع الراتنج المستخدم وكميته فى الخلطة ومن أهم الأنواع المستخدمة:

- الأيبوكسى
- البولى إستر
- الفينول فورمالدهيد
- فورفورال أستيون

وهذه الخرسانة لها مقاومة تزيد بدرجة كبيرة عن الخرسانة الأسمنتية وتتوقف الزيادة على نوع الراتنج المستخدم وكميته فى الخلطة (أنظر شكل ٣-٢٢).

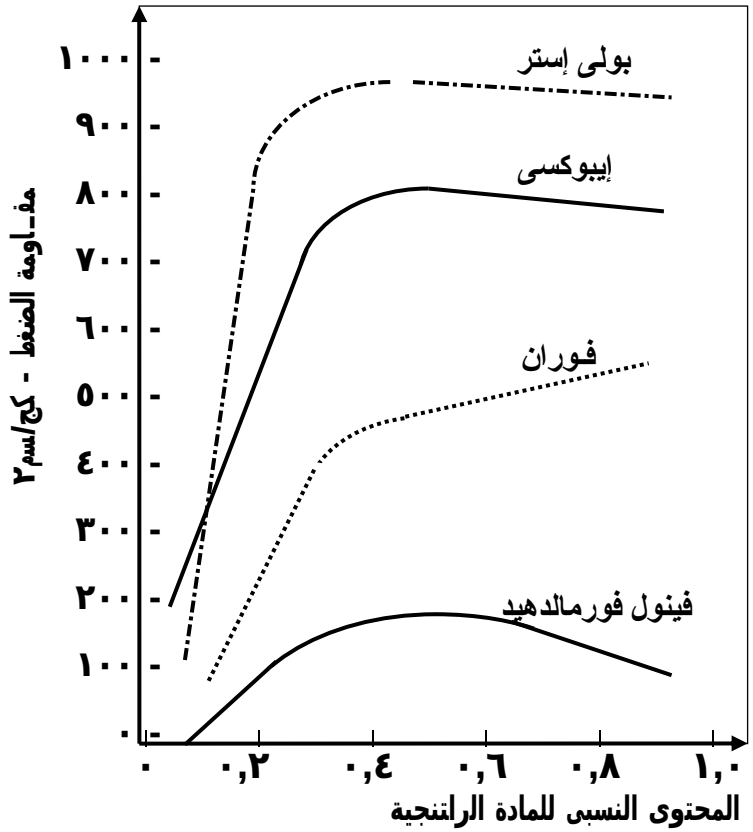
أهم تطبيقات الخرسانة البلاستيكية

١- طبقة حماية سطحية لأسطح الكبارى والمصانع وأماكن الخدمات والسلالم والخرسانة المسلحة و سابقة الإجهاد.

٢- ترميم الخرسانات التى حدث بها شروخ نتيجة الحرارة أو الإنكماش أو الأهتزازات.

٣- لصق الخرسانة الحديثة والقديمة أو الوحدات سابقة الصب.

٤- لصق الخرسانة على المعادن كطريقة للتقوية والتسليح الخارجى.



شكل (٣-٢٢) مقاومة الضغط لبعض الأنواع من الخرسانة البلاستيكية.

٣-٩-٢ الخرسانة البوليمرية الأسمنتية PCC

وهى التى تصنع بخلط الأسمنت والركام ويضاف اليها ماء الخلط المضاف إلية الراتنج. أى أنها خرسانة تقليدية مع إحلال جزء من ماء الخلط بواسطة مواد راتنجية. والراتنج المضاف يكون فى عبوتين: إحداهما تحتوى على المونومر والأخرى تحتوى على المصلد اللازم للتفاعل الكيميائى وإتمام عملية البلمرة (إتحاد الجزيئات) وتتم عملية البلمرة أثناء عملية التصلد للخرسانة. ومن ثم تتكون شبكة مستمرة من البوليمرات تملء أغلب فراغات الخرسانة. ويجب لذلك الحذر بأن لاتعطل عملية البلمرة طور الإماهة للأسمنت. ومن أهم المونومرات الشائعة الإستخدام كإضافة للخرسانة:

١- فينيل اسيتات	٢- الإكريلات
٣- فينيل كلوريد	٤- مستحلبات البيتومين
٥- المطاط	٦- الإيبوكسيات

وتجدر الإشارة إلى أن العلماء الروس قد توصلوا إلى خرسانة أسمنتية بوليمرية ذات خواص عالية وذلك بإدماج فورفريل الكحول "Furfryl Alcohol" وهيدروكلوريد الإيثيلين فى خليط الخرسانة مما نتج عنه خرسانة كثيفة ومعدومة الإنكماش تقريباً وذات مقاومة عالية للصدأ وذات مسامية منخفضه ومقاومة للإهتزازات. وعموما فإن النتائج التى تم الحصول عليها نتيجة إستخدام المونومرات كإضافات للخرسانة العادية أثناء الخلط قد أعطت تأثيرا محدودا على خواصها الميكانيكية وإن كان التأثير أكثر وضوحا على القوام والقابلية للتشغيل.

٣-٩-٣ الخرسانة الأسمنتية المحقونة بالبوليمرات PIC

وهى الخرسانة الأسمنتية المتصلدة والتى سبق صبها ويتم حقنها أو غلغلتها بواسطة مونومرات ذات لزوجة منخفضة ثم تتم البلمرة لهذه المونومرات بعد ذلك وهى داخل الخرسانة وتنقسم إلى ثلاثة أنواع:

أ - الخرسانة المغلغلة كليا :

وتستخدم لمقاومة درجات الحرارة العالية أو عند التعرض إلى المياه المالحة. وفيها يتم بدء تنشيط عملية البلمرة وذلك أما بالإشعاع Radiation أو بالحرارة Thermal method وأهم المونومرات التى تستخدم فى هذه الطريقة هى:

- المثيل ميثا كريلات	Methyl methacrylate
- الستيرين	Styrene
- الكلوروستيرين	Chlorostyrene

وقد أوضحت التجارب أن الخرسانة المغلغلة بالمثيل ميثاكريلات والتى تتم بلمرتها بالإشعاع لها مقاومة ضغط تصل إلى حوالى ٣٠٠ % عند درجة تشبع بالبولميرات مقدارها ٦,٦ %. وأوضحت النتائج أيضا أن هناك زيادة وتحسينات مناظرة لكل من مقاومة الشد ومعاير المرونة ومقاومة التجمد والذوبان ومقاومة البرى والتفاذية ومقاومة الكيماويات.

ب - الخرسانة المغلغلة جزئيا:

وقد تم عمل هذه الخرسانة كأسلوب لتبسيط عملية الغلغلة وتقليل التكاليف وذلك لإستيفاء التطبيقات التى تتطلب المتانة أكثر من القوة وأهم المواد المستخدمة فى هذه الطريقة هى البولى إسترسترين و الميثيل ميثاكريلات وتتأثر خواص الخرسانة الناتجة بدرجة كبيرة بعمق الغلغلة بالبوليمر وبالتالى مقدار التشبع به. وبصفة عامة فإن الخرسانة المغلغلة جزئيا تعطى نتائج عالية جداً وإن كانت أقل نسبيا من الخرسانة المغلغلة كليا.

ج - الخرسانة المغلغلة سطحيا:

وهى شبيهة بالخرسانةالمغلغلة جزئيا وإن كانت المونومرات المستخدمة فى هذه الطريقة لها لزوجة منخفضه وبالتالى فهى أكثر تطاير ولها معدلات بطيئة فى الإختراق داخل الخرسانة وهذه الطريقة من الغلغلة مناسبة لكبارى الطرق السريعة.

تطبيقات الخرسانة المغلغلة بالبوليمر

١- خرسانة محطات تنقيه المياه المالحة (مقاومة الحرارة + المواد الكيماوية)
٢- أرضيات الكبارى السابقة الإجهاد
٣- الدعامات الخرسانية لأسقف مناجم الفحم
٤- الأنفاق والمنشآت تحت الماء
٥- قواعد المضخات والمنشآت البحرية والخرسانات الخفيفة
٦- مواسير المجارى والضغط

٣-١٠ الخرسانة الخفيفة Lightweight Concrete

من أهم عيوب الخرسانة التقليدية (٢٢٠٠ إلى ٢٥٠٠ كج/م^3) كمادة إنشائية بالمقارنة مع الخشب والحديد أن الخرسانة التقليدية ثقيلة الوزن نسبياً حيث تكون نسبة الوزن الذاتى لأجزاء المبنى Own weight بالمقارنة مع الأحمال المؤثرة هى نسبة عالية فى جميع الأحوال. ولذلك تم التفكير فى إنتاج وإستخدام خرسانة خفيفة وزنها أقل من ٢٠٠٠ كج/م^3. ولذلك فقد أمكن تصنيع خرسانة إنشائية تزن ١٤٠٠ إلى ١٩٠٠ كج/م^3 بزيادة بسيطة فى التكاليف وكذلك إنتاج خرسانة نصف انشائية للبلوكات الداخلية تزن ٩٠٠ كج/م^3 وتستعمل بكفاءة كحوائط داخلية. وعموماً فإن الخرسانة الخفيفة هى تلك التى يقل وزنها عن ٢٠٠٠ كج/م^3. والغرض من إستخدامها هو تقليل وزن المنشأ وبالتالى تقليل تكاليف الأساسات وكذلك لأغراض العزل الحرارى والصوتى.

أنواع الخرسانة الخفيفة

يمكننا تخفيض وزن الخرسانة عن طريق واحد أو أكثر من الطرق الآتية:

١- إيجاد فراغات بين حبيبات الركام (خرسانة خالية من المواد الرفيعة Finless Concrete)

٢- إيجاد فراغات داخل الركام (خرسانة ذات ركام خفيف Lightweight Aggregate Concrete)

٣- إيجاد فراغات داخل العجينة الأسمنتية (الخرسانة المهواة أو الخلوية Cellular Concrete)

٣-١٠-١ خرسانة خالية من المواد الرفيعة Finless Concrete

تتكون من الأسمنت والركام الكبير فقط وأحيانا يستخدم فيها الهواء عن طريق إضافة مواد رغوية أو بإستعمال تدرجات خاصة من الركام. والركام الكبير يمكن أن يكون زلط أو أحجار مكسرة أو ركام خفيف. وينحصر تدرج الركام بين ١٠ مم ، ٢٠ مم ولا تتعدى نسبة المار من المنخل الصغير عن ٥% وهذا النوع من الخرسانة ذو كثافة تتراوح من ٣/٢ إلى ٤/٣ كثافة الخرسانة التقليدية المصنوعة من نفس الركام. وهذا النوع يحتاج إلى تصميم دقيق وخصوصاً بالنسبة لمحتوى الماء.

٣-١٠-٢ خرسانة الركام الخفيف Lightweight Aggregate Concrete

خرسانة الركام خفيف الوزن هى أكثر أنواع الخرسانات الخفيفة شيوعاً وإستخداماً إذ يمكن إستعمالها كخرسانة إنشائية. والركام المستخدم فى الخرسانة الإنشائية الخفيفة هو فى أغلب الأحوال ركام صناعى. وصناعة الركام تعتبر أحد أجزاء التصنيع للخرسانة الخفيفة ومن أمثلة الركام الخفيف:

- الطين الممدد (الليكا) - الفيرموكليت - الفوم (بوليسترين)

شكل (٣- ٢٣) يوضح بعض أنواع الركام خفيف الوزن.

الصفات الواجب توافرها فى الركام الخفيف

١- يجب أن تكون حبيبات الركام متجانسة من حيث التركيب والصفات.
٢- „ „ „ „ „ „ „ ذات وزن نوعى منخفض.
٣- „ „ „ „ „ „ „ ذات مقاومة مناسبة (عامل مؤثر على مقاومة الخرسانة).
٤- „ „ „ „ „ „ „ ذات قدرة على التماسك مع حبيبات الأسمنت.
٥- „ „ „ „ „ „ „ ذات مقاومة جيدة للعوامل الجوية.
٦- يجب أن تحتوى الحبيبات على أكبر عدد ممكن من الفراغات الداخلية الصغيرة المنفصلة وعلى أقل عدد ممكن من الفراغات الكبيرة المتصلة.

٣-١٠-٣ الخرسانة المسواة (ذات الخلايا) Cellular Concrete

وفى هذا النوع تتكون فقاعات من الغازات والهواء فى وسط الخرسانة وهى فى الحالة الطازجة ويظل التركيب مسامى بعد أن تشك الخرسانة. والطريقتين الرئيسيتين لإنتاج هذا النوع هما:

أ - انتاج غازات فى الخلطة بتفاعلات كيميائية

ب- إضافة مواد رغوية للخلطة.

ومن المواد الشائعة المولدة للغازات المسحوق الناعم من بودرة الألمونيوم أو بودرة الزنك (٠,٢% من وزن الأسمنت) وعند خلطها بالأسمنت تتكون فقاعات من الهيدروجين فتنتفخ الكتلة مكونة عند تصلدها مادة ذات تركيب خلوى. وتجدر الإشارةإلى أن هناك علاقة طردية بين وزن الخرسانة ومقاومتها للضغط.

شكل (٣-٢٣) بعض انواع الركام خفيف الوزن.

٣-١١ الخرسانة الثقيلة Heavy Weight Concrete

وهى خاصة بالوقاية من الإشعاع الذرى والنووى حيث تتناسب قدرة الخرسانة لإمتصاص هذه الإشعاعات مع وزنها أو كثافتها وبالتالى تكون حوائط وبلاطات الأرضيات والأسقف من الخرسانة الثقيلة. وتصنع الخرسانة الثقيلة من ركام من مواد ثقيلة من خامات الحديد أو خام الرصاص. وتجدر الإشارة أن خام الحديد يعطى خرسانة وزنها من ٣٠٠٠ إلى ٤٠٠٠ كج/م^{٣} ، وقد تستخدم قطع من الحديد كركام وتصل كثافة خرسانتة الى ٥٦٠٠ كج/م^{٣}. ومن الممكن أيضاً إستخدام النواتج الثانوية للفرن العالى مثل جلخ المحولات الأكسجينية وخردة سى لإنتاج خرسانة ذات كثافة حوالى ٢٨٠٠ كج/م^{٣}. ويستخدم فى بعض الأحيان ركام من صخر السربنتين (سليكات الماغنسيوم المماهة) وبصفة عامة فلابد لركام الخرسانة ثقيلة الوزن أن يوفى بمتطلبات الكثافة والتركيب وذلك للوقاية من الإشعاع . ويستخدم الأسمنت البورتلاندى العادى ولكن يفضل الأسمنت منخفض الحرارة فى حالة الخرسانة الكتلية ثقيلة الوزن كما لا يستخدم الأسمنت سريع التصلد. أيضاً لا تستخدم إضافات المعجلات أو إضافات الهواء المحبوس وإنما يمكن إستخدام الملدنات و المؤجلات.

ونظراً لأن الركام المكون من قطع الحديد يميل دائماً إلى الإنفصال عند خلطه أو صبه بالطرق التقليدية فإنه يفضل إستخدام الخرسانة الثقيلة سابقة الرص Prepacked Concrete والتى تعتبر أكثر مناسبة فى هذه الحالة. وتصنع الخرسانة سابقة الرص من دفع وضخ المونة خلال فراغات ركام نظيف ومرصوص و مدموك جيداً و مشبع بالماء. وعندما تضخ المونة خلال القوالب أو الفرم فتزيح ما بها من ماء وهواء وتملأ الفراغات وبذلك تنتج خرسانة ذات كثافة عالية بها نسبة عالية من الركام. ويميز هذه الخرسانة سهولة صبها فى بعض المناطق أو الأحوال التى يصعب فيها صب الخرسانة التقليدية.

٣-١٢ الخرسانة الكتلية Mass Concrete

وهى خرسانة ذات كتل كبيرة مثل خرسانة السدود والخزانات الأرضية أو أى خرسانة بحيث يكون حجمها من الكبر بحيث يتطلب ذلك أخذ الإحتياطات من تولد الحرارة الناتجة من إماهة الأسمنت وما يتبع ذلك من إنكماش وتشريخ للخرسانة. ويستخدم فى الخرسانة الكتلية ركام كبير قد يصل مقاسه حوالى ١٥ سم. ونظرا لوجود حرارة تفاعل عالية من الأسمنت فإنه ينبغى أخذ بعض الإحتياطات الضرورية مثل:

- إستخدام أسمنت من النوع منخفض الحرارة Low heat.
- إستخدام محتوى قليل من الأسمنت خلطة فقيرة Lean mix.
- إحلال نسبة من ١٠ إلى ٢٠% من الأسمنت بمادة بوزولانية مثل غبار السلسكا أو الرماد المتطاير.
- إستخدام الثلج المجروش بدلاً من جزء من ماء الخلط و تسمى هذه العملية بالتبريد السابق.
- وجود مواسير رفيعة من الصلب رقيق الجدران داخل الكتلة الخرسانية تمرخلالها دورات من الماء البارد لخفض الحرارة و تسمى هذه العملية بالتبريد اللاحق.
- الصب على طبقات قليلة الإرتفاع بحد أقصى واحد متر.
- العزل السطحى للخرسانة برقائق من البوليسترين أو اليوريثان وذلك بغرض تنظيم معدل هبوط الحرارة (وليس خفض الحرارة) بحيث يقل فرق الإجهاد الناتج من الهبوط السريع لدرجة الحرارة عند سطح الخرسانة وداخلها.

****

الباب الرابع

صناعة الخرسانة

Manufacture of Concrete

يمكن تقسيم المراحل التى تمر بها صناعة الخرسانة الى ثلاثة مراحل رئيسية هى:

١ - مرحلة ماقبل الصب (الإعداد) Preparation

أ ـ إختيار المكونات وتصميم الخلطات
ب ـ تشوين المواد
ج- إعداد الفرم والشدات
د ـ تحضير الكميات والعبوات

٢ - مرحلة الصب Fresh Concrete

أ ـ الخلط
ب- النقل
ج- الصب
د- الدمك
هـ ـ التشطيب

٣ - مرحلة ما بعد الصب Green Concrete

أ- المعالجة
ب- إزالة الفرم والشدات
ج- الترميم والبياض

٤-١ مرحلة الإعداد (قبل الصب) Preparation

أ – إختيار المكونات

- يتم تحديد وإختيار النوع المناسب من كل مادة فمثلاً نوع الأسمنت المناسب للعملية (بورتلاندى عادى أو مقاوم للكبريتات أو منخفض الحرارة أو .....) وكذلك نوع الرمل المناسب (ناعم أو خشن أو ...) وليس المقصود بكلمة المناسب هنا الناحية الفنية فقط وإنما جميع النواحى الأخرى مثل الناحية الإقتصادية مثلاً.
- المقاس المناسب للركام الكبير طبقاً لنوعية ومقاس قطاعات الخرسانة التى ستُصب (قواعد أو أعمدة أو لبشة).
- إمكانية إستخدام بعض الإضافات أم لا وفى أى مرحلة من الصب.
- عمل تصميم للخلطة المطلوبة وتحديد الكميات اللازمة من كل مادة بالوزن والحجم.

ب- التشوين

- يراعى التأكد من توافر كل المواد اللازمة للصبة الخرسانية قبل البدء فى الصب.
- يتم تشوين المواد فى الأماكن المناسبة وبالترتيب المناسب والتى تسهل نقلها إلى مكان الصب.
- يكون التشوين لكل مادة بالطريقة المنصوص عليها فى المواصفات فمثلاً:

الأسمنت: يشون على أرضيات خشبية مهواه ويكون فى حماية من رطوبة الجو والأرض والمطر ويجب أن لا يستخدم فى أعمال الخرسانة المسلحة أى أسمنت بدأت تتكون به حبيبات متصلدة أو كتل أو مضى على تشوينه أكثر من ثلاثة شهور. وطبقاً للكود المصرى فيجوز إستخدام الأسمنت لغاية ستة أشهر بعد التأكد من سلامته.

الرمل: يكون على أرضيات صلبة نظيفة وبعيداً عن المطر أو أى مواد ملوثة.

الزلط: يغسل لإزالة الشوائب منه ويشون على أرضيات خرسانية أو خشبية.

الماء: عدم الإعتماد على ماء الصنبور خشية حدوث أى عطل وإنما ينبغى تخزين الماء مسبقا فى موقع الصب فى أوعية لا تصدأ.

الإضافات: تحفظ فى مكان أمين فى درجة حرارة الغرفة وبعيد عن الرطوبة وأشعة الشمس المباشرة وتراعى جميع التعليمات الخاصة بكل مادة على حدة.

ج- إعداد الفرم والشدات

- يتم إختيار نوع الشدات المناسب للعملية (شدات عادية - شدات منزلقة - شدات صلب).
- تكون الشدات قوية لتتحمل وزن الخرسانة والأحمال الحية أثناء الصب.
- يجب أن ترتكز قوائم الشدات على قواعد ثابتة.
- أن تكون القوالب محكمة لمنع تسرب اللبانى من الخرسانة.
- يجب تربيط الركائز بحيث لا تؤثر عليها الصدمات الأفقية الناتجة عن حركة العمال أو المعدات الصغيرة وكذلك ضغط الرياح و الإرتجاجات الناتجة عن المعدات المستخدمة فى العمل.
- تُرش أسطح الفرم الخشبية بالماء قبل الصب مباشرة لمنع إمتصاص الأخشاب لماء الخلط.
- يجب إعداد مسارات للعمل بحيث لا تؤثر حركتها على أبعاد وأشكال حديد التسليح.
- يفضل و ضع تخانات تفصل بين سطح القوالب و الأسياخ.
- يجب أن تنظف الفرم من الداخل بعناية قبل رص أسياخ التسليح وقبل صب الخرسانة مباشرة وذلك بإزالة الأتربة والفضلات ويمكن أن يتم ذلك بإستخدام الماء أو الهواء المضغوط.

د- تحضير الكميات والعبوات

الأسمنت: يفضل أن تحتوى عبوة الخرسانة على عدد صحيح من شكاير الأسمنت ولايسمح بمعايرة الأسمنت بالحجم وفى حالة إستعمال الأسمنت السائب يجب قياس الأسمنت بالوزن.

الركام: يقاس بالحجم بصناديق قياس ويجب ملء الصناديق بدون دمك. ويراعى الزيادة فى حجم الرمل نتيجة الرطوبة أو البلل وفى الأعمال الإنشائية الهامة يفضل قياس الركام بالوزن.

الماء: يقاس باللتر أو بالكيلوجرام ويجب أن يؤخذ فى الإعتبار كمية الماء المحتمل وجودها فى الركام.

الإضافات: تحدد فى أغلب الأحيان بالوزن كنسبة من الأسمنت.

٤-٢ مرحلة الخرسانة الطازجة (الصب) Fresh Concrete

أ- الخلط

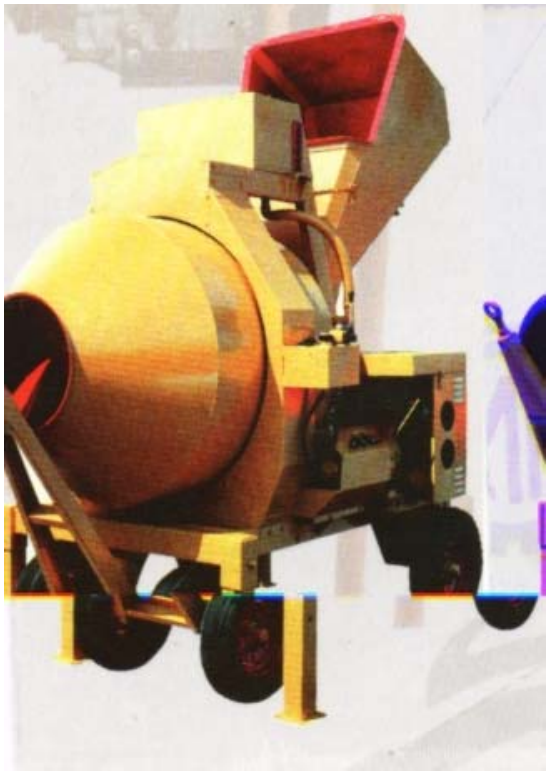
- نوع الخلط: يلزم خلط الخرسانة ميكانيكياً إما فى الموقع أو فى عربة خلط أو من خلال محطة خلط مركزية كما هو موضح بشكل (٤-١). أما شكل (٤-٢) فيوضح عربة سعة ١٠ متر مكعب لخلط ونقل الخرسانة ، بينما تظهر فى شكل (٤-٣) صورة لخلاطة موقع سعة ٠,٧٥ متر مكعب. و إذا دعت الضرورة القصوى لخلط الخرسانة يدويا فيتم ذلك بعد موافقة المهندس الإستشارى للمشروع وفى هذه الحالة يتم الخلط بتقليب المواد تقليباً جيداً بالنسب المطلوبة على طبلية مستوية صماء بواسطة الجاروف ذى الشداد ويلزم خلط الأسمنت مع الركام قبل وضع الماء ويقلب على ثلاث دفعات على الأقل ثم يضاف الماء تدريجيا بالقدر المطلوب للخلطة ويستمر التقليب والخلط حتى تتجانس الخلطة لوناً وقواما.

خلط فى الموقع		خلط أثناء النقل	خلط فى محطة مركزية بعيد عن الموقع
يدوى	ميكانيكى	ميكانيكى (عربة الخلط)	ميكانيكى

- زمن الخلط: يجب أن لا يقل زمن الخلط عن دقيقتين بعد وضع الأسمنت والركام أو لا يقل عن دقيقة واحدة بعد إضافة الماء. وذلك حتى يصبح الخليط متجانس فى اللون والقوام مع مراعاة عدم زيادة سرعة الخلاط عن السرعة المحددة له حتى لا يحدث إنفصال حبيبى كذلك لا يجب زيادة زمن الخلط عن ٥ دقائق لنفس السبب.

شكل (٤-١) محطة خلط مركزية لإنتاج الخرسانة.

شكل (٤-٢) عربة خلط خرسانة سعة ١٠ متر مكعب.



شكل (٤–٣) خلاطة موقع سعة ٠,٧٥ م٣.

شكل (٤–٤) طلمبة ضخ خرسانة – ٤٢ متر.

شكل (٤–٥) إستخدام عربات خلط ونقل الخرسانة و طلمبة الضخ فى صب أحد مراحل كوبرى ٦ أكتوبر.

ب- النقل و المناولة

- يلزم صب الخرسانة بعد تمام خلطها مباشرة مع مراعاة تجنب إنفصال مكوناتها على أن لاتزيد المدة مابين إضافة ماء الخلط وصب الخرسانة على ٣٠ دقيقة فى الجو العادى و ٢٠ دقيقة فى الجو الحار وأن يتم دمكها قبل مضى ٤٠ دقيقة فى الجو العادى و ٣٠ دقيقة فى الجو الحار أما إذا أستلزم الأمر زيادة الفترات السابقة فإنه يلزم إضافة مؤجلات للشك عند الخلط بعد موافقة المهندس الإستشارى للمشروع وذلك حتى لا تجف الخرسانة أو يحدث لها شكا إبتدائياً وخاصة فى الأماكن الحارة وحتى لا يحدث وصلات أو فواصل فى الخرسانة المصبوبة.
- يجب عدم حدوث أى إهتزازات للخرسانة أثناء النقل.
- ويكون النقل على حسب درجة المشروع وحجمه كما يلى:
  - ❑ نقل الخرسانة على سطح الأرض بإستخدام القواديس - عربات اليد - العربة القلابة.
  - ❑ نقل الخرسانة على مستويات عالية وذلك برفع القواديس بإستخدام الونش.
  - ❑ نقل الخرسانة على مستويات تحت الأرض وذلك بالجاذبية بإستخدام مجارى مائلة أو فى أنابيب.
  - ❑ حديثا يوجد مضخات للخرسانة Concrete Pump بمعدلات مختلفة تتناسب مع حجم المشروع. شكل (٤-٤) يوضح أحد المضخات ذات زراع بطول ٤٢ متر بينما يوضح شكل (٤-٥) إستخدام المضخات فى صب خرسانة أحد الكبارى.
  - ❑ يجوز تفريغ الخرسانة على طبلية صماء توطئة لنقلها يدويا مع مراعاة عدم تفريغ خلطة جديدة على الطبلية إلا بعد تمام نقل الخلطة السابقة.

ج- الصب

يجب مراعاة الإحتياطات الآتية أثناء عملية الصب:

- فى حالة صب الحوائط والأعمدة التى يتجاوز إرتفاعها ٢,٥متر فلا يجوز صبها بكامل الإرتفاع ويجب عمل شباك فى أحد جوانب القالب على إرتفاعات لاتزيد عن ٢,٥متر ويتم الصب من هذه الفتحات حيث يتم تقفيلها أولاً بأول مع مراعاة دمك الخرسانة ميكانيكيا.
- فى حالة صب بلاطة أو لبشة خرسانية بإرتفاع كبير يراعى أن تصب على طبقات سمكها يتراوح من ٤٠ إلى ٥٠ سم.
- يلزم مراعاة تحديد أماكن إيقاف الصب وسطح نهاية الصب (بلاطات وكمرات وأعمدة) مسبقاً قبل بدء الصب. وينبغى أن يكون إيقاف الصب فى الأماكن التى عندها عزم الإنحناء يساوى صفر أو بأقل قيمة ممكنة. ويراعى ترك سطح الخرسانة عند نهاية الصب مائلا خشنا فى البلاطات والكمرات وأفقيا خشنا فى الأعمدة. ولا يفضل وقف الصب عند المقاطع التى عندها قوى قص عالية.
- يجب فى كل منطقة من مناطق الصب البداية بصب الكمرات الرئيسية ثم الكمرات الثانوية ثم الأسقف.

- إذا زادت درجة الحرارة على ٣٦ درجة مئوية فى الظل يجب مراعاة الإحتياطات الآتية:

- ❑ تظليل تشوينات الركام الكبير والصغير ويمكن تبريد الركام الكبير بإستخدام رشاشات مياه.
- ❑ إذا كان الأسمنت سائباً فى صوامع فإنه يجب دهانها من الخارج بمادة عاكسة لأشعة الشمس أما إذا كان فى أكياس فترص تحت سقيفة مهواة.
- ❑ يبرد الماء قبل إستعماله فى خلط الخرسانة بإستخدام الثلج أو بأى وسيلة أخرى.
- ❑ دهان الخلاطات من الخارج بمواد عاكسة لأشعة الشمس أو تغطية الحلة بطبقة من الخيش مع رشها بالماء.
- ❑ رش القوالب بالمياه قبل الصب مباشرة.

- الصب على خرسانة قديمة : ينبغى أن يترك سطح الخرسانة القديمة خشن وغير مستوى وقبل الصب عليه ينظف من الأتربة ويزال الركام غير المتماسك كما ينظف حديد التسليح بفرشة سلك ثم يُندى سطح الخرسانة ويُصب عليه لبانى الأسمنت ويُفضل أن يُرش أو يُدهن سطح الخرسانة القديمة بمادة راتنجية تعمل على لحام الخرسانة القديمة مع الخرسانة الحديثة.

- صب الخرسانة الكتلية : ينبغى الصب على طبقات قليلة الإرتفاع بحد اقصى واحد متر مع إستخدام أسمنت منخفض الحرارة (لوهيت) وكذلك يمكن وضع مواسير داخل الخرسانة تمر خلالها دورات من الماء البارد لخفض درجة الحرارة.

- صب الخرسانة تحت الماء : يوجد طرق عديدة لصب الخرسانة تحت الماء منها:

١- طريقة القادوس (ترميو) Tremie

و فيها تُصب الخرسانة من خلال قادوس أو قمع متصل بماسورة قطرها من ١٠ إلى ١٥ سم تصل إلى القاع المطلوب صب الخرسانة عليه بحيث يراعى أن حافة الماسورة السفلية تكون غاطسة فى الخلطة الخرسانية على أن تُرفع الماسورة أثناء الصب بمعدل لايسمح بخروج الماسورة من الخلطة حتى لاتتسرب المياه بداخلها كما بشكل (٤-٦).

٢- طريقة ضخ الخرسانة Concrete Pumping

وهى تطوير لطريقة القادوس حيث تصب الخرسانة بالضخ عن طريق مواسير ممدودة إلى قاع مكان الصب.

٣- طريقة الدلو Bucket

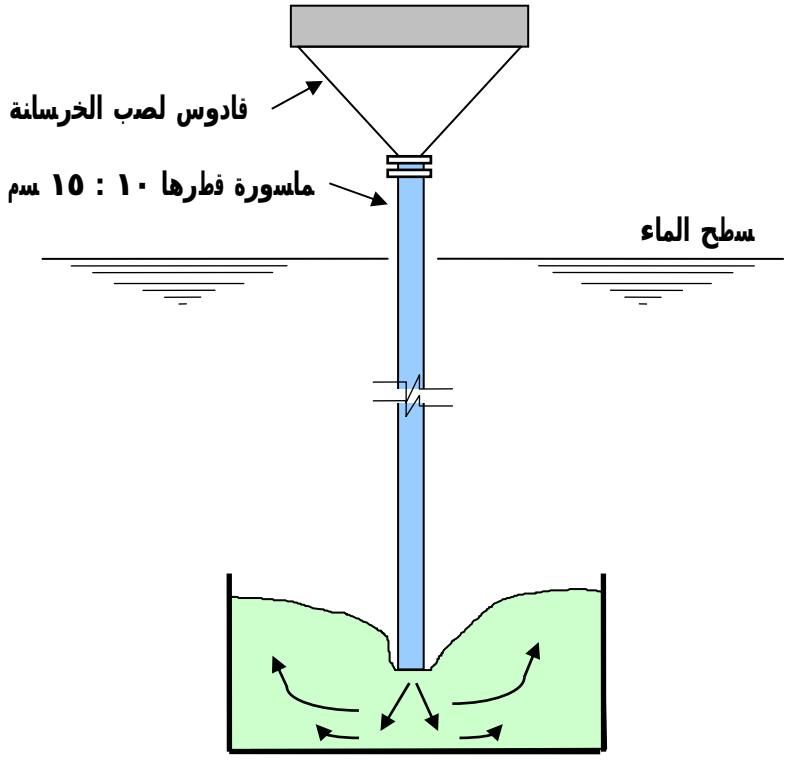
وهو عبارة عن وعاء على شكل متوازى مستطيلات أوإسطوانة مفتوحة من أعلى ومجهزة من أسفل ببوابة قابلة للفتح والغلق. يملء الدلو بالخرسانة ويغطى سطحه بطبقة من القماش المشمع ثم ينزل برفق فى الماء حتى مكان الصب ويفرغ ثم يرفع.

٤- طريقة الركام المحقون Grouted Aggregates

تعبأ الشدات بالركام ثم يحقن بالأسمنت اللبانى بواسطة أنابيب تمتد إلى قاع الفرم حيث يدفع الأسمنت الماء خارج الفرم ويحل محله مالئاً الفراغات بين حبيبات الركام.

٥- طريقة أكياس الخرسانة Sacked Concrete

وفيها يتم وضع خرسانة ذات قوام جاف (مفلفلة) فى أكياس (أجولة) من الجوت سعة كل منها واحد متر مكعب تقريبا وتربط الأكياس جيداً ثم ترص فى مكان الصب فى صفوف مترابطة كما فى حالة بناء الحوائط بحيث تكون الأكياس فى النهاية كتلة واحدة متماسكة متداخلة.



شكل (٤-٦) صب الخرسانة تحت الماء بطريقة القادوس.

د- الدمك Compaction

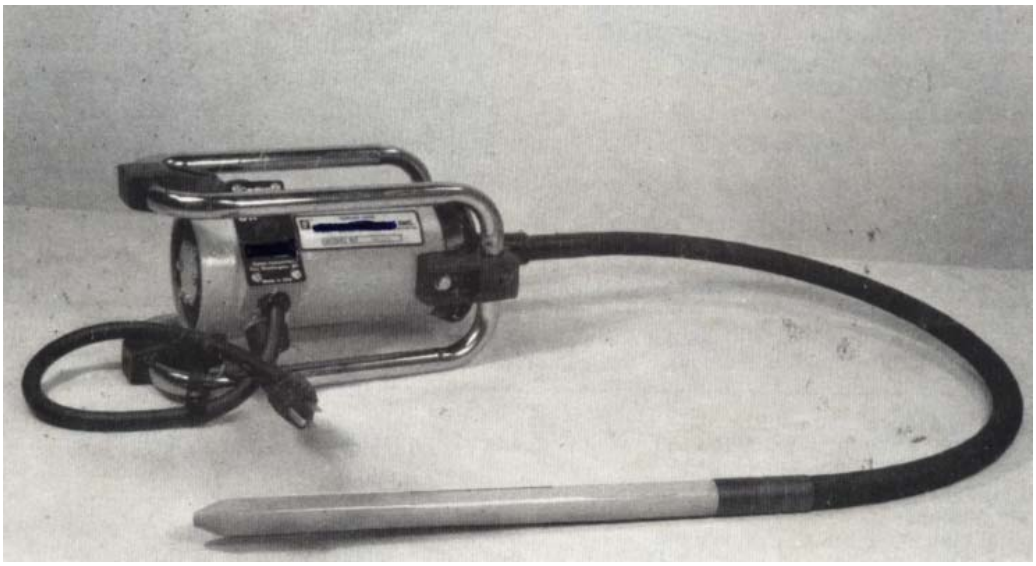
الغرض من عملية الدمك هو تقليل الفراغات والفجوات داخل الخرسانة والتأكد من تمام إنسياب الخلطة الخرسانية حول حديد التسليح وملء القالب تماماً إلى المنسوب المطلوب. وطرق الدمك هى:

دمك يدوى	دمك ميكانيكى		
قضيب الدمك Tamping Rod	هزازات داخلية Internal Vibrators	هزازات الفرم Formwork Vibrators	هزازات سطحية Surface Vibrators

ويوضح شكل (٤-٧) صورة هزاز ميكانيكى داخلى يعمل بالكهرباء ، بينما يوضح شكل (٤-٨) إستخدام الهزاز فى دمك الخرسانة. و يجوز الدمك يدوياً إذا لم ينص على إستعمال الوسائل الميكانيكية. وينبغى أن يقوم بالدمك شخص متخصص وله خبرة فى الدمك. يجب الإستمرار فى الدمك حتى ينتهى خروج فقاقيع الهواء أو تظهر طبقة رقيقة من عجينة الأسمنت على السطح النهائى للخرسانة ولا يسمح بالدمك بعد ذلك لأنه يسبب النضح Bleeding. كما ينبغى عدم لمس الهزاز الداخلى لحديد التسليح أثناء الدمك. ويراعى أن لا يتسبب الدمك بأى حال من الأحوال عن قلقلة الخرسانة السابق صبها أو زحزحة أسياخ التسليح من مكانها. شكلى (٤-٨) ، (٤-٩) يوضحان نوعين من الخرسانة أثناء الصب حيث نجد الخرسانة فى الصورة الأولى جافة نسبياً و تحتاج إلى إستخدام الهزاز الميكانيكى وقتاً كبيراً نسبياً. بينما نجد أن الخرسانة فى الصورة الثانية لها من السيولة والإنسيابية ما يجعلها ربما لاتحتاج إلى إستخدام الهزاز.

هـ- التشطيب Finishing

- معاملة السطح طبيعيا للحصول على سطح معمارى ناعم وذلك بإستخدام الواح ذات اسطح مستوية وملساء لعمل الفرم الخاصة وقد تكون من الأبلاكاج أو الإسبستوس أو الكونتر أو.....
- يمكن تجهيز الفرم بفواصل معينة للحصول على سطح يوحى أنه مبنى من الحجر.
- من الممكن عمل رسومات هندسية مثل الدوائر أو أوراق الشجر على طول ممرات الحدائق.
- يمكن أيضا تمشيط الخرسانة أو إظهار الركام الكبير بها ويتم ذلك غالبا فى المرحلة الخضراء من الخرسانة.



شكل (٤-٧) هزاز خرسانة بمحرك زمبة يعمل بالكهرباء .

شكل (٤-٨) صب خرسانة جافة نسبياً
تحتاج إستخدام الهزاز وقت أكبر.

شكل (٤-٩) صب خرسانة عالية السيولة
والإنسيابية لاتحتاج إستخدام الهزاز

٤-٣ مرحلة ما بعد الصب Green Concrete

أ- معالجة الخرسانة Curing

إن مقاومة الخرسانة للضغط وقوة إحتمالها ومقاومتها لنفاذ الماء وثبات حجمها يزداد بمرور الوقت (شكل٤-١٠) بشرط أن تكون الظروف مهيئة لإستمرار التفاعل الكيماوى بين الماء والأسمنت وذلك بحفظ درجة معينة ومناسبة من الرطوبة أو منع الماء من التبخر والمعالجة بإختصار تتم عن طريق:

١- إما منع تبخر ماء الخرسانة بتغطيتها أو قفل مسامها بعمل غشاء أو طبقة مانعة للتبخر.
٢- أو إضافة الماء بإستمرار للتعويض عن الماء الذى يتبخر.

ومن المواد المستعملة فى المعالجة:

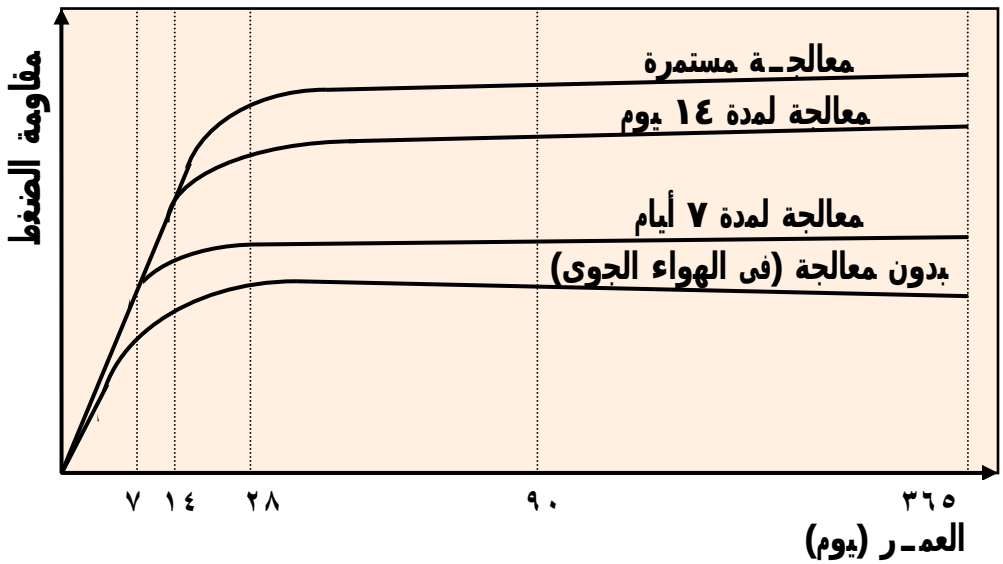
١- الماء.
٢- الخيش المرطب.
٣- الأغشية المانعة للتسرب مثل : لفائف البلاستيك والورق المانع لتسرب الماء.
٤- مركبات أو إضافات المعالجة والتى تعمل على سد مسام الخرسانة.
٥- مواد أخرى مثل الرمل الطبيعى والتبن والقش ونشارة الخشب والركام الناعم.

وطرق المعالجة كثيرة نذكر منها:

١- الغمر بالماء على شكل برك (فى الأسطح الأفقية والأرضيات).
٢- الرش بالماء - (حفظ السطح رطبا بين مواعيد الرش مع عدم السماح له بالجفاف).
٣- التغطية بالخيش الرطب.
٤- التغطية باللفائف المانعة لتسرب الماء.
٥- المعالجة بإستعمال المركبات الكيماوية (العازلة للرطوبة - السدودة).
٦- المعالجة بالبخار Steam Curing:

تحت ضغط عادى (ضغط الجوى) وتستغرق ١٠-١٦ ساعة .
تحت ضغط عالى وتستغرق ٧-٨ ساعات.

والمعالجة بالبخار تستخدم فى مصانع الخرسانة الجاهزة وهى عملية معقدة ومكلفة ولكنها تؤدى إلى السرعة فى عملية الإماهة والتصلد للإسراع من الإنتاج وتجنب مشاكل التخزين وتفيد فى عمل خلطات ذات محتوى ماء قليل فتزيد المقاومة وتقل نسبة الإنكماش وتكون ذات مقاومة أعلى للكبريتات.



شكل (٤-١٠) تأثير المعالجة على مقاومة الخرسانة.

ب- إزالة الفرم والشدات

إن المدة الواجب إنقضاؤها بين صب الخرسانة وفك الشدات تتوقف على درجة الحرارة وطول البحر ونوع الأسمنت المستخدم وأسلوب المعالجة والحمل الذى سيتعرض له المنشأ بعد الفك. ويشترط أن لا ينتج عن الفك حدوث أى ترخيم أو شروخ أو تشوهات غير مسموح بها. ويجب مراعاة أن لا تتعرض الخرسانة للإهتزازات أو الصدمات أثناء الفك. وفى حالة إستعمال أسمنت بورتلاندى عادى فيمكن إزالة الفرم والشدات الخشبية بعد مدة لاتقل عن القيم الآتية:

- الجوانب والأعمدة المعرضة لقوى ضغط محورى فقط يمكن فكها بعد ٢٤ ساعة.
- الكمرات والبلاطات بعد مدة = ٢ل + ٢ يوم

حيث ل = طول بحر الكمرة أو البحر الأصغر للبلاطة بالمتر. بحيث لاتقل المدة عن أسبوع.

- الكوابيل بعد مدة = ٤ل + ٢ يوم

حيث ل = بروز الكابولى بالمتر. بحيث لاتقل المدة عن أسبوع.

- عندما تكون الفرم والركائز حاملة لأحمال إضافية كما فى حالة الطابق الذى يحمل وزن الطابق التالى حديث الصب فلا يجوز فك القوائم إلا بعد إنقضاء ٢٨ يوماً مع إتخاذ كافة الإحتياطات التى تضمن إرتكاز القوائم على أرضية تتحمل الأثقال عليها بأمان وبعد التأكد من أن مقاومة الخرسانة بعد ٢٨ يوم قد أوفت بإشتراطات المشروع.

❑ فى حالة إستعمال أسمنت بورتلاندى غير عادى أو فى الحالات التى تنخفض فيها درجات الحرارة عن ١٥ درجة مئوية فيجب الحذر وتأجيل فك الفرم والشدات الخشبية مدة مناسبة بالإضافة إلى المدد المشار إليها عاليه.

ج- الترميـم والبيـاض

- يشتمل الترميم على:

إزالة الزوائد - ملء الفجوات وأماكن التعشيش - تنظيف السطح الخارجى للخرسانة.

- طريقة ملء الفجوات:

يتم تنظيف أماكن العيوب وإزالة المونة والركام الضعيف
تُبلل الفجوات بالماء ثم تُفرش بمونة الأسمنت والرمل بنسبة ١:١ بالوزن
تُصب مونة الترميم والمكونة من أسمنت ورمل بنسبة ٣:١ بالوزن بحيث تكون بارزة قليلا عن سطح الخرسانة وتُترك مدة ٢ ساعة تقريبا ثم يسوى السطح على السطح المحيط به.
(يفضل إستخدام مونة الجراوت مباشرة فى مثل هذه الأعمال).

- أما معالجة السطح الخارجى فتتم بطرق عديدة منها:

١- تنظيف السطح الخارجى بإستخدام الخيش والمونة الغنية بالأسمنت وذلك لملء الثقوب الصغيرة و إعطاء سطح الخرسانة لون متجانس.
٢- الغسيل بالأسمنت.
٣- الطرطشة: وذلك برش طبقة من مونة الأسمنت والرمل الناعم على سطح الخرسانة.
٤- البياض بالمحارة: وذلك بعمل طبقة من مونة الأسمنت والرمل بسمك ٢:١ سم ثم تمشط أو تنعم.

****

الباب الخامس

تصميم الخلطات الخرسانية

Concrete Mix Design

٥-١ مقدمة

تصميم الخلطات الخرسانية يعنى تحديد القيم النسبية لمكوناتها Proportioning بما يتفق مع المتطلبات المرغوبة لعمل معين. ويكون ذلك بإستخدام نسب ثُبتت فاعليتها من الخبرة وتسمى بالنسبة الوضعية Empirical Proportioning وقد يكون بطرق حسابية مبنية على أساس فنى تتضمن خواص المواد المستخدمة والخواص المطلوبة فى الخرسانة المتصلدة (مثل مدى المقاومة للأحمال أو المقاومة للبرى) والإشتراطات التى تتطلبها خطوات صناعة الخرسانة مثل السهولة المناسبة للصب Placing والتسوية النهائية (التشطيب Finishing) لسطح الخرسانة. وذلك مع مراعاة التكاليف الإقتصادية حسب نوع العمل الإنشائى المطلوب. وهذه الطرق الحسابية تهدف الى إستخدام المواد الموجودة Available Materials لنحصل منها على خرسانة ذات خواص مطلوبة فى الحالتين الطازجة والمتصلدة وذلك بأقل التكاليف Required Qualities at Minimum Cost ويمكن إعتبار أن مقاومة الخرسانة للضغط تبين مدى جودة Quality الخرسانة المتصلدة كما تعبر قيمة الهبوط Slump عن مدى جودة الخرسانة الطازجة.

ويعتبر تحديد نسب الخلطة الخرسانية من أهم العوامل التى تؤثر على جودة الخرسانة وعلى إقتصاديات المشروع. فمن الممكن الحصول على خرسانات متباينة فى جودتها وثمنها بالرغم أن جميعها تتكون من نفس المواد. ويعتمد الإقتصاد النسبى للخلطات الخرسانية على أثمان مكوناتها وعلى أجور العمال وتكاليف النقل لتلك المكونات. ويعتبر الأسمنت أحد المكونات الأساسية للخرسانة والذى تؤثر نسبة وجوده فى الخلطة تأثيراً كبيراً على تكاليفها نظراً لغلو ثمنه بالنسبة لباقى المكونات.

٥-٢ كيفية بيان نسب مكونات الخرسانة Expressing Proportions

❐ تُبَيَن مكونات الخرسانة من المواد الحبيبية Granular Materials وهى الأسمنت والركام الصغير والركام الكبير عادة على هيئة نسب Ratios بالوزن أو بالحجم فمثلا عندما يقال خلطة ١ : ٢ : ٤ معناها:

الأسمنت	الرمل	الزلط
١	٢	٤

أى تحتوى على جزء من الأسمنت وجزئين من الرمل وأربعة أجزاء من الزلط. وتفضل أن تكون تلك النسب بالوزن لعدم إمكان التحديد الدقيق لكمية الأسمنت بالحجم وأيضا الركام نتيجة تغير الكمية التى يستوعبها حجم معين بتغيير مدى الدمك Compaction المستخدم. كما أن الركام الصغير قد يتغير حجمه بتأثير ظاهرة زيادة الحجم Bulking بالرطوبة.

- وقد تُبَيَن المواد الحبيبية كنسبة بين الأسمنت والركام الخليط Cement/Agrregates Ratio فمثلاً خلطة ١: ٦ أى جزء واحد أسمنت وستة أجزاء ركام بالوزن وتبين هذه النسبة مدى غنى او إفتقار الخرسانة Rich or Lean Mix فالخلطة ١ : ٤ تعتبر خلطة غنية أما الخلطة ١ : ٨ فتعتبر خلطة فقيرة.

- وقد تُبَيَن نسب المواد الحبيبية بما يحوية المتر المكعب للخرسانة الطازجة من الأسمنت والركام الصغير والركام الكبير على أن يُبين الأسمنت بالوزن والركام بالحجم تسهيلاً لتحضير الكميات عند الخلط فمثلا بخلطة .

أسمنت	رمل	زلط
٣٠٠ كيلوجرام	٠,٤ متر مكعب	٠,٨ متر مكعب

ومجموع هذة الكميات يعطى تقريبا بعد خلطها بالماء حوالى متر مكعب من الخرسانة الطازجة

- كما يمكن ان يُعبَر عن الأسمنت بعدد الشكاير للمتر المكعب من الخرسانة الطازجة وهذا العدد يسمى معامل الأسمنت Cement Factor فمثلاً خلطة يحتوى المتر المكعب منها على ٦ شكاير أسمنت (الشيكارة وزنها ٥٠ كيلو جرام) وخلطة أخرى غنية يحتوى المتر المكعب منها على ٨ شكاير أو خلطة فقيرة يحتوى المتر المكعب منها على ٤ شكاير:

أسمنت	رمل	زلط
٦ شكاير	٠,٤م^3	٠,٨ م^3

- وتُبَيَن كمية الماء اللازمة للخلطة على هيئة نسبة من الأسمنت بالوزن فمثلا خلطة بها نسبة الماء الى الأسمنت = ٠,٥ بالوزن ، فاذا علم وزن الأسمنت فى المتر المكعب للخرسانة الطازجة أمكن تعيين وزن الماء اللازم له لإجراء الخلط وبالتالى يمكن تعيين حجم ذلك الماء باللتر. وأحياناً قد تُبَيَن كمية ماء الخلط اللازمة للمتر المكعب من الخرسانة الطازجة مباشرة فمثلا خلطة:

أسمنت	رمل	زلط	ماء
٣٠٠ كج	٠,٤م^3	٠,٨ م^3	١٥٠ لتر

أى أن المتر المكعب من الخرسانة الطازجة لهذه الخلطة يلزم له ٣٠٠ كج أسمنت (٦ شكاير) و ١٥٠ لتر ماء. وتحسب الكميات المطلوبة من المواد لأى خلطة تبعا لعدد الأمتار المكعبة الكلية من الخرسانة الطازجة.

❐ وتُبَيَن كمية الإضافات -إن وجدت- على أساس أنها نسبة مئوية من وزن الأسمنت المستخدم بالخلطة فمثلا خلطة:

أسمنت	رمل	زلط	ماء
٣٠٠ كج	٠,٤ م^3	٠,٨ م^3	١٥٠ لتر

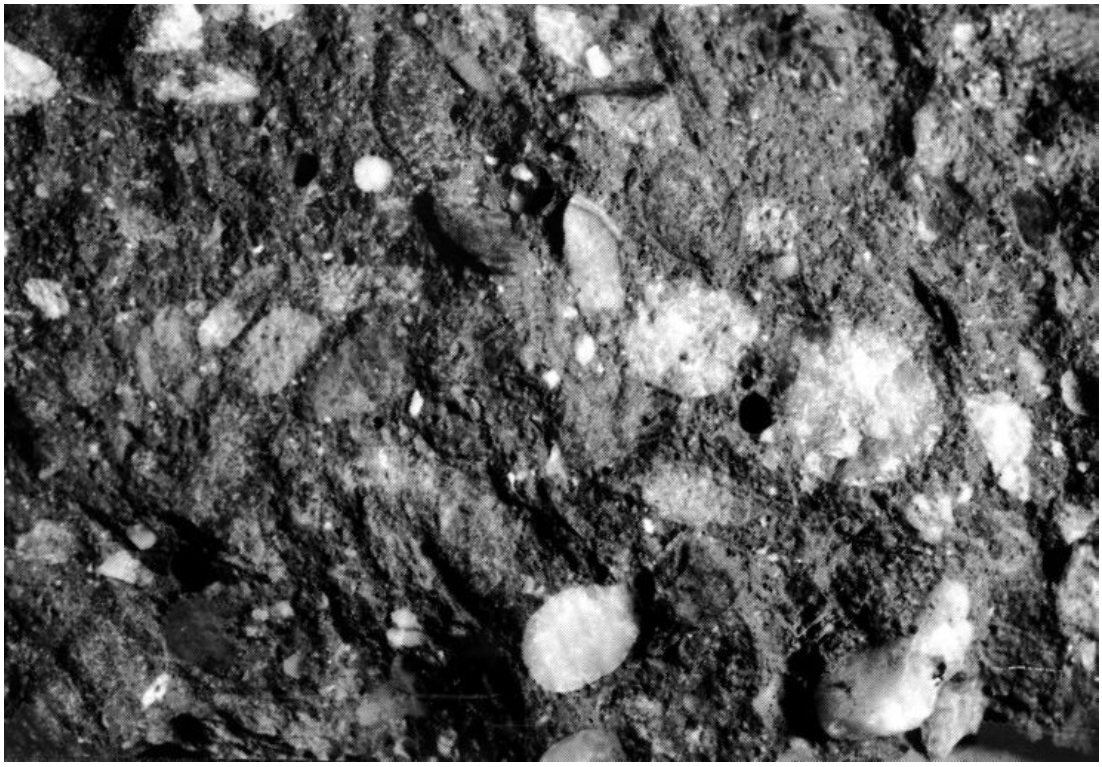
بها ٢ % ملدنات تعنى أن وزن الملدنات المستخدم = ٣٠٠ × ٠,٠٢ = ٦ كيلو جرام للمتر المكعب من الخرسانة الطازجة.

٥-٣ العلاقة بين الركام والعجينة الأسمنتية Aggregate-Paste Relationship

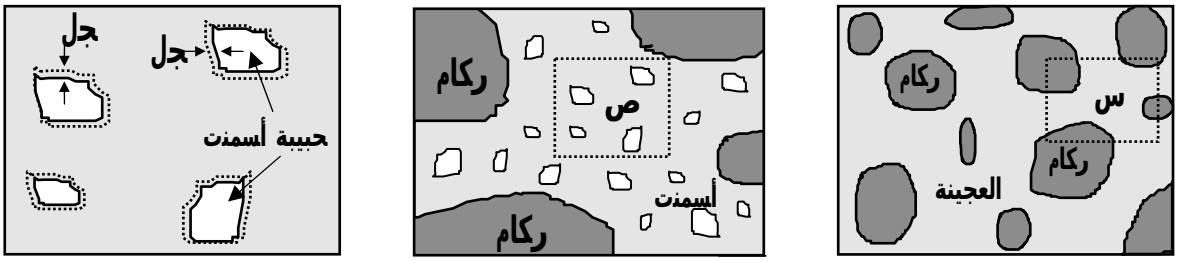
تتركب الخرسانة من عجينة أسمنتية (نشطة) وركام (خامل) وتعتمد مقاومة الخرسانة على مقاومة العجينة حيث أن مقاومة الركام كبيرة جداً بالنسبة لمقاومة العجينة. ولذلك فإن إنهيار الخرسانة التقليدية يكون دائماً فى العجينة ويمر الشرخ حول الركام. فإذا أمكننا إنتاج عجينة ذات مقاومة عالية جداً تقترب من مقاومة الركام فإننا نحصل على خرسانة عالية المقاومة High Strength Concrete والتى يكون الإنهيار فيها مفاجىء حيث يمر الشرخ بالركام (وليس حوله) ويشطره كما فى شكل (٥-١).

ومن الجدير بالذكر أن تشغيلية الخرسانة تنتج من تأثير تشحيم العجينة للركام وتتأثر بمقدار سيولة العجينة. كما تعتمد نفاذية الخرسانة للسوائل على وجود واستمرار العجينة الأسمنتية. وبالإضافة الى ذلك فإن إنكماش الكتلة الخرسانية الدائم يكون ناتج من العجينة الأسمنتية وليس الركام.

والعجينة الأسمنتية تكون عبارة عن مُعلق Suspension للأسمنت فى الماء (شكل ٥-٢). وكلما خفت درجة تركيز المعلق كلما زادت المسافة بين حبيبات الأسمنت وكلما قلت بالتبعية بنية العجينة. وهذا يوضح أن مقاومة الضغط للخرسانة دالة عكسية مع نسبة الماء إلى الأسمنت (م/س). وعندما تبدأ عملية الإماهة للأسمنت فيتكون الجل من الماء ومن مادة سطح حبيبات الأسمنت والذى قد يصل حجمه الى ضعف حجم الأسمنت الناتج منه. وهكذا مع إستمرار الإماهة يستمر تكون الجل حول كل حبيبة حتى يتصل الجل ببعضه مكوناً بنية العجينة.



شكل (٥-١) الكسر فى الخرسانة عالية المقاومة يمر خلال الركام وليس حوله.



شكل (٥-٢) علاقة العجينة الأسمنتية بالركام.

٥-٤ طرق تصميم الخلطات الخرسانية Mix Design Methods

أولاً : الطريقة الوضعية Empirical Method

تحدد هذه الطريقة نسباً لمكونات الخرسانة نتيجة الخبرة Experience السابقة للإستعمال بنجاح. وقد أثبتت هذه الطريقة ملائمتها وصلاحيتها للعمليات الصغيرة Small Jobs نظراً لسهولتها حيث تعطى المواد الصلبة (الأسمنت ، الرمل ، الزلط) على هيئة نسب بالوزن أو الحجم وقد تحدد كمية الماء اللازم أو تترك لمراعاتها أثناء الخلط بحيث نحصل على خلطة لدنة Plastic سهلة التشغيل Workable. ونسب مكونات الخرسانة بالوزن المستخدمة عادة فى المنشآت طبقا لنوع الخرسانة أو طبقا لمقاومة الخرسانة للضغط هى كما يلى :

	الأسمنت	الرمل	الزلط	أى	الأسمنت	الركام
خلطة غنية ذات مقاومة عالية	١	١	٢		١	٣
خلطة متوسطة	١	٢	٤		١	٦
خلطة فقيرة ذات مقاومة منخفضة	١	٣	٥		١	٨

وذلك على أساس أن الركام مناسب والماء أقل ما يمكن لجعل الخلطة ذات قوام Consistency مناسب لتكون لدنة. والنسب الوضعية المستخدمة فى جمهورية مصر العربية هى:

أسمنت	رمل	زلط
س كج	٠,٤ م^3	٠,٨ م^3

مع كمية الماء المناسبة والمعقولة وتتراوح قيمة الماء كنسبة من الأسمنت (م/س) من ٠,٤ إلى ٠,٧ بالوزن ويحدد كميتها طبيعة العمل. أما كمية الأسمنت "س" فيحددها نوع العمل والخلطة اللازمة له هل هى غنية أو فقيرة حيث تتراوح "س" من ٢٠٠ إلى ٤٠٠ كيلوجرام أى من ٤ إلى ٨ شكاير للمتر المكعب من الخرسانة. ويحدد كمية الأسمنت وكمية الماء المهندس المسئول عن مواصفات العملية تبعا لطبيعتها .

❐ وعيوب هذه الطريقة تتلخص فى النقاط الآتية:

١- نسبة الماء / الأسمنت (م/س) غير محددة ومتروكة لظروف العمل.
٢- النسبة المذكورة لا تعطى متراً مكعبا فى جميع الحالات وقد يصل الحجم أحياناً إلى ١,٢ م^3.
٣- نسبة الرمل / الزلط شبه ثابتة وهى ١: ٢ مع ملاحظة إهمال نوع الركام وتدرجه والمقاس الإعتبارى الأكبر له وكذلك إهمال معاير النعومة للرمل.
٤- لا يمكن الحصول على بيانات صحيحة لخواص الخرسانة الناتجة وكذلك لا يمكن توقع قيمة دقيقة لمقاومة الضغط لهذه الخرسانة.

ثانياً : طريقة المحاولة Trial Method

تعتمد هذه الطريقة على معرفة نسبة م/س فى الخلطة الخرسانية ويلزم عمل إختبارات مقارنة بين المواد المختلفة والخلطات المتباينة. وتتطلب هذه الطريقة وجود عينات من الأسمنت والزلط والرمل كما يجب تحديد نسبة م/س وكذلك المقاومة المطلوبة.

❐ وفيما يلى ملخص لخطوات تصميم خلطة خرسانية بطريقة المحاولة:

- تؤخذ كمية من الأسمنت فى حدود ٢,٥ كج (٥% من وزن الشيكارة).
- تحدد نسبة (م/س) من الخبرة أو من المنحنيات البيانية أو من الجداول.
- يخلط الأسمنت والماء لتكوين عجينة الأسمنت المكونة من أ ، ب.
- تحضر كمية من الرمل والزلط ويفضل إستخدام الركام المشبع والسطح جاف كما يراعى ألا يزيد المقاس الإعتبارى الأكبر عن ١/٥ البعد الأصغر للمقطع وأن لا يزيد عن ٣/٤ المسافة بين أسياخ حديد التسليح (أيهما أصغر).
- يضاف تدريجيا كميات من الرمل والزلط وتخلط الخلطة جيداً ثم يحدد قوام الخرسانة إلى أن تصل إلى الخلطة التى تعطى القوام المطلوب.
- توزن بعد ذلك الكميات المتبقية ومنها تحسب الأوزان المستعملة.
- تحسب الكميات بالوزن والحجم المطلوبة لعمل خلطة الخرسانة لموقع العمل .

ثالثاً: طريقة الحجم المطلق Absolute Volume Method

تفترض هذه الطريقة أن الحجم المطلق للخرسانة هو مجموع الحجوم المطلقة للمواد المكونة للخرسانة Concrete Ingredients أى الحجم المطلق للأسمنت والرمل والزلط والماء كما يلى:

$$\text{Absolute Volume} = \frac{C}{G_c} + \frac{S}{G_s} + \frac{G}{G_g} + \frac{W}{1.0} = 1000 \text{ Liters}$$

حيث :

C = وزن الأسمنت بالكيلوجرام اللازم للمتر المكعب من الخرسانة .
S = وزن الرمل ،، ،، ،، ،، ،، ،، ،،
G = وزن الزلط ،، ،، ،، ،، ،، ،، ،،
W = وزن المـاء ،، ،، ،، ،، ،، ،، ،،

G_c , G_s , G_g = الوزن النوعى للأسمنت والرمل والزلط على التوالى

علماً بأن واحد متر مكعب من الخرسانة = ١٠٠٠ لتر.

وفى هذه الطريقة يلزم تحديد كلاً مما يأتى طبقا للإشتراطات المطلوبة فى مقاومة الخرسانة المتصلدة Strength والإشتراطات المطلوبة فى مدى تشغيل Workability الخرسانة الطازجة:

١ـ كمية الأسمنت اللازمة للمتر المكعب من الخرسانة.
٢ـ نسبة الماء إلى الأسمنت بالوزن (م/س) أو كمية الماء للمتر المكعب من الخرسانة.
٣ـ نسبة الركام الصغير إلى الركام الكبير فى الركام المستخدم.
٤ـ الوزن النوعى للأسمنت والركام الكبير والركام الصغير.

وتحدد البيانات سالفة الذكر من واقع الخبرة Experience ومن النتائج العملية Practice ومن الإختبارات المعملية Laboratory Tests أى أننا نحدد قيمة C ، W/C ، G/S وكذلك نحدد الأوزان النوعية G_c G_s , G_g ثم تُطبق المعادلة سالفة الذكر لتعيين وزن كل من الرمل والزلط. واذا أريد بيان النسب بين المكونات الحبيبية للخرسانة بالوزن للأسمنت وبالحجم للركام يلزم معرفة الوزن الحجمى لكل من الرمل والزلط (أى وزن المتر المكعب) وذلك من واقع الخبرة والتجارب.

❐ وتتضح تلك الطريقة فى المثال التالى :

المطلوب تصميم خلطة خرسانية بحيث تكون الخرسانة الطازجة لدنة القوام Plastic وبحيث تكون الخرسانة المتصلدة ذات مقاومة للضغط بعد ٢٨ يوم تساوى ٢٤٠ كج/سم^{٢}. مع مراعاة أن الركام الخليط المستخدم يمر منه نسبة ٤٠% من المنخل القياسى ١٦/٣ مع العلم بأن:
الوزن النوعى للأسمنت = ٣,١٥.
الون النوعى للركام (الرمل أو الزلط) = ٢,٦٥.
الوزن الحجمى للركام (الرمل أو الزلط) = ١٧٠٠ كج/سم^{٣}.

الحـــل

أ ـ تُعين نسبة الركام الصغير (الرمل) إلى الركام الكبير (الزلط):
يعتبر المار من المنخل القياسى ١٦/٣ هو الرمل والمحتجز عليه هو الزلط. إذن يتبين أن النسبة المئوية للرمل فى الركام الخليط تساوى ٤٠% وبالتالى الزلط يساوى ٦٠%.

ملاحظة: هذه النسبة قد تفرض طبقا للخبرة والسوابق العملية ـ والنسبة الشائعة الإستخدام قد تفرض مباشرة على أساس ٣٣% للرمل أى نسبة الرمل إلى الزلط تساوى ١ : ٢

ب ـ تفرض كمية الأسمنت اللازمة للمتر المكعب من الخرسانة على أساس مقاومة الخرسانة المتصلدة بعد ٢٨ يوم أو على أساس أى متطلبات أخرى خاصة بمتانة الخرسانة أو الظروف التى تعمل فيها.

ومن الخبرة العملية يمكن إستخدام هذه العلاقة:
كمية الأسمنت اللازمة للمترالمكعب = مقاومة للضغط بعد ٢٨ يوم (كج/سم^{٢}) + ٥٠ إلى ١٠٠

إذن كمية الأسمنت اللازمة للمتر المكعب = ٢٤٠ + ٦٠ = ٣٠٠ كج/م٣.

ج - تُعين كمية الماء اللازمة للمتر المكعب من الخرسانة طبقا لمحتوى الأسمنت فى الخلطة والمقاس الإعتبارى للركام المستخدم وكذلك درجة القابلية للتشغيل المطلوبة. وهذه الكمية قد تفرض مباشرة طبقا للخبرة أو بالإستعانة بالجدول (٥-١).

فى هذا المثال نفرض أن (م/س) = ٠,٥

إذن كمية الماء للمتر المكعب من الخرسانة = ١٥٠ لتر.

جدول (٥-١) العلاقة بين كمية ماء الخلط ومحتوى الأسمنت.

المقاس الإعتبارى الأكبر للركام (مم)	قيمة (م/س) لمحتوى أسمنت (كج) لكل متر مكعب خرسانة				
	٢٠٠	٢٥٠	٣٠٠	٣٥٠	٤٠٠
١٠	٠,٧٠	٠,٦٠	٠,٥٠	٠,٤٧٥	٠,٤٠
٢٠	٠,٦٥	٠,٥٥	٠,٤٥	٠,٤٢٥	٠,٣٨٥
٤٠	٠,٦١	٠,٤٨	٠,٤٢٥	٠,٣٨٥	٠,٣٧

د- يحسب تصميم الخلطة الخرسانية كما يلى :

وزن الزلط = (٦٠ / ٤٠) وزن الرمل = ١,٥ وزن الرمل

$$\text{Absolute Volume} = \frac{300}{3.15} + \frac{S}{2.65} + \frac{1.5S}{2.65} + \frac{150}{1.0} = 1000 \text{ litres}$$

وزن الرمل ،، ،، ، ،، = ٨٠٠ كج.

وزن الزلط ،، ،، ، ،، = ١٢٠٠ كج.

❑ نسب الخلطة الخرسانية بالوزن :

أسمنت	رمل	زلط	ماء
٣٠٠ كج	٨٠٠ كج	١٢٠٠ كج	١٥٠ كج
١ :	٢,٦٧ :	٤ :	٠,٥

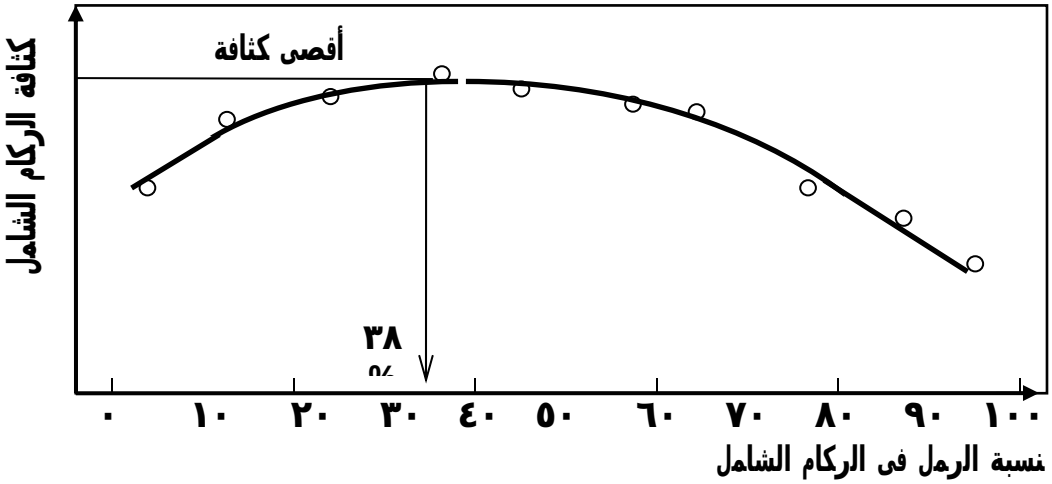
❑ نسبة الخلطة الخرسانية بالحجم :

أسمنت	رمل	زلط	ماء
$\frac{٣٠٠}{٥٠}$ شكارة	$\frac{٨٠٠}{١٧٠٠}$ م٣	$\frac{١٢٠٠}{١٧٠٠}$ م٣	١٥٠ لتر
٦ شكاير	٠,٤٧ م٣	٠,٧١ م٣	١٥٠ لتر

وتجدر الأشارة إلى أن تعيين نسبة الركام الصغير (الرمل) إلى الركام الكبير (الزلط) يمكن أن يتم على أسس أخرى هامه منها :

أ- طريقة الكثافة القصوى Optimum Unit Weight Method

وفيها يتم عمل خلطات من الركام الجاف فقط تحتوى على نسباً مختلفة من الرمل إلى الركام الخليط فمثلاً : صفر % ، ١٠ % ، ٢٠ % ، ....١٠٠ % مع تعيين وحدة الوزن لكل منها ثم نوقع القراءات على منحنى ويمكن من هذا المنحنى إيجاد نسبة الرمل التى ستكون عندها وحدة الوزن نهاية قصوى أى الحصول على أقل نسبة فراغات ممكنة. ويتضح ذلك من شكل (٥-٣) الذى يبين أن نسبة الرمل ٣٦ % تعطى أقصى وحدة وزن للركام الخليط.



شكل (٥-٣) الكثافة القصوى للركام الخليط

ب- طريقة المساحة السطحية للركام Surface Area Method

الأساس العلمى فى هذه الطريقة هو الربط بين كمية عجينة الأسمنت فى الخلطة الخرسانية والمساحة السطحية للركام الذى تغلف أسطحة لإتمام عملية الإلتصاق بين حبيباته ومعنى ذلك بأنه فى الخلطات الخرسانية ذات الركام الصغير المقاس فإنه يحتاج لزيادة كمية الأسمنت بسبب زيادة المساحة السطحية لهذا الركام. وإحدى طرق التعبير المذكورة هى إستخدام المساحة السطحية للركام الخليط ومقاومة الضغط للخرسانة وذلك بمعرفة مقاومة الضغط المطلوبة للخرسانة أو قد تفرض المساحة السطحية للركام الخليط بقيمة تتراوح من ٢٤ إلى ٢٦ سم^{٢}/جم التى تعطى غالبا أكبر قيمة للمقاومة. وبالتالى نحدد التدرج المطلوب أو نسبة الرمل فى الركام الشامل.

٥-٥ تصميم الخلطات الخرسانية عالية المقاومة Design of HSC Mixes

الخلطات الخرسانية عالية المقاومة تتميز بوجود عدد كبير من المواد التى ينبغى إختيار الكميات والنسب المثلى منها للوصول إلى خرسانة ذات خواص مرغوبة خاصة من ناحية القابلية للتشغيل والمقاومة والمعمرية (المتانة). وتصميم الخلطات الخرسانية عالية المقاومة يعتمد على نوعية وجودة المواد بدرجة أكبر من إعتماده على نسب الخلطة. ولقد سبق أن تناولنا الخصائص المطلوب توافرها فى مكونات الخرسانة عالية المقاومة وذلك فى باب الخرسانات الخاصة. وفيما يلى شرح موجز لخطوات تصميم الخلطات الخرسانية عالية المقاومة

١- يتم تقرير إستخدام مادة غبار السليكا فى الحالات الآتية:

- إذا كانت المقاومة المطلوبة للخرسانة أكبر من ٨٠٠ كج/سم٢.
- عندما تكون الخرسانة قليلة النفاذية ضرورية ومرغوبة.
- فى حالة خرسانة الضخ حتى لايحدث إنفصال حبيبى.
- عندما تكون الخرسانة معرضة لمواد كيميائية خاصة الكلوريدات.

٢- يمكن فرض محتوى غبار السليكا طبقاً لمقاومة الضغط المطلوبة كما هو موضح بالجدول الآتى:

مقاومة الضغط للخرسانة كج/سم٢	نسبة غبار السليكا المضاف كنسبة من وزن الأسمنت
٧٠٠ إلى ٨٠٠	٥ إلى ١٠%
٨٠٠ إلى ٩٠٠	١٠ إلى ١٥%
٩٠٠ إلى ١٠٠٠	١٥ إلى ٢٠%
أكبر من ١٠٠٠	٢٠ إلى ٢٥%

ملحوظة : يفضل أخذ الحد الأعلى لنسبة غبار السليكا عندما يكون الزلط هو المستخدم فى الخلطة أما فى حالة إستخدام الدولوميت أو الجرانيت فيفضل أخذ الحد الأدنى لنسبة غبار السليكا.

٣- يتم تحديد نوع الأسمنت المستخدم طبقاً لتقرير التربة الخاص بالعملية أو اللوح التنفيذية للمنشأ وعادة ما يكون إما أسمنت بورتلاندى عادى أو أسمنت بورتلاندى فائق النعومة أو أسمنت مقاوم للكبريتات. وبصفة عامة فإن كفاءة مادة غبار السليكا تكون أكبر فى حالة إستخدام الأسمنت البورتلاندى العادى بالمقارنة بباقى أنواع الأسمنت. ولا يُنصح بإستخدام الأسمنت المقاوم للكبريتات إلا فى حالة وجود نسبة عالية من أملاح الكبريتات فى التربة أو فى المياه الجوفية. أما فى الأحوال العادية أو الأحوال التى تكون فيها مقاومة الكلوريدات أهم من مقاومة الكبريتات فينصح بإستخدام الأسمنت البورتلاندى العادى.

٤- يحدد محتوى الأسمنت فى المتر المكعب خرسانة طبقاً لمحتوى غبار السليكا المستخدم كمايلى:

نسبة غبار السليكا المضاف كنسبة من وزن الأسمنت	محتوى الأسمنت كج/م^{٣}
١٥ إلى ٢٠%	٤٥٠
٥ إلى ١٥%	٤٧٥
عدم وجود غبار السليكا	٥٠٠

٥- يتم إختيار نوع الملدنات (Superplasticizers) بحيث يكون من النوع المطابق للمواصفات الأمريكية ASTM C494 Type F. وفى حالة الحرارة الشديدة أو فى حالة طول مدة صب وصناعة الخرسانة فيفضل نوع الملدنات المطابق للمواصفات الأمريكية ASTM C494 Type G

٦- يمكن فرض نسبة الملدنات (Superplasticizers) طبقاً لمقاومة الضغط المطلوبة وذلك بعد عمل إختبار تأكيدى على خلطة تجريبية صغيرة للتأكد من توافق المادة مع الأسمنت المستخدم والحصول على المقاومة و القابلية للتشغيل المطلوبتين.

مقاومة الضغط للخرسانة كج/سم^{٢}	نسبة الملدنات كنسبة من وزن الأسمنت + غبار السليكا
٤٠٠ إلى ٥٠٠	١,٠ إلى ١,٥%
٥٠٠ إلى ٦٠٠	١,٥ إلى ٢,٠%
٦٠٠ إلى ٧٠٠	٢,٠ إلى ٢,٥%
أكبر من ٧٠٠	٢,٥ إلى ٣,٥%

٧- يتم إستخدام الزلط كركام كبير فى الخلطة الخرسانية إذا كانت مقاومة الضغط المطلوبة لاتتجاوز ٧٥٠ أو ٨٠٠ كج/سم^{٢} وفى حالة خرسانة ذات مقاومة أكبر من ذلك فمن الضرورى إستخدام كسر حجر قوى (دولوميت أو جرانيت).

٨- يفضل أن لا يزيد المقاس الإعتبارى الأكبر للركام الكبير عن ٢٠ مم. والركام مقاس ١٤ مم أو حتى ١٠ مم يعطى مقاومة أفضل بشرط أن يكون الركام متدرج وسليم وقوى. وتفرض النسبة بين الركام الكبير والرمل وفقاً لأى طريقة كما فى حالة الخرسانة التقليدية (عادية المقاومة).

٩- تفرض نسبة الماء إلى المواد الأسمنتية (أسمنت + غبار سليكا) من المعادلة التجريبية الآتية مع مراعاة أن لايقل وزن الماء عن ٠,٢٢ من وزن المواد الأسمنتية. علماً بأن هذه المعادلة مستنتجة على أساس خرسانة تحتوى على ملدنات وتعطى خلطة لدنة القوام (هبوط = ٨

إلى ١٢ سم). وقد تم إستنتاج هذه المعادلة بتحليل نتائج أكثر من ١٥٠ خلطة خرسانية ذات مقاومة تتراوح من ٥٠٠ إلى ١١٠٠ كج/سم٢.

$$w/cm = \frac{\log\left\{\frac{\alpha\,(1000 - C - SF)}{f_c}\right\}}{3.0 * \log(\beta)}$$

حيث:

w/cm النسبة بين وزن الماء ووزن المواد الأسمنتية (الأسمنت + غبار السليكا)

f_c هى مقاومة الخرسانة كج/سم٢

C هى وزن الأسمنت فى المتر المكعب من الخرسانة - كج

SF هى وزن غبار السليكا فى المتر المكعب من الخرسانة - كج

α عامل يتوقف على نوع الركام الكبير المستخدم ويساوى ١٣ ، ١٤ ، ١٥ للزلط والجرانيت والدولوميت على الترتيب.

β عامل يتوقف على نوع الأسمنت ويساوى ١٣,٠ ، ١٢ ، ١٠,٥ للأسمنت البورتلاندى العادى والأسمنت المقاوم للكبريتات والأسمنت فائق النعومة على الترتيب.

والجدول الآتى يعطى بعض القيم لنسبة الماء إلى المواد الأسمنتية (*w/cm*) وذلك لتحقيق مقاومة ضغط بعد ٢٨ يوم = ١٠٠٠ كج/سم٢ بإستخدام محتوى أسمنت = ٤٧٥ كج/م٣.

المقاومة المطلوبة = ١٠٠٠ كج/سم٢ محتوى الأسمنت = ٤٧٥ كج/م٣		غبار السليكا كنسبة مئوية من وزن الأسمنت				
		٠%	١٠%	١٥%	٢٠%	٢٥%
- أسمنت بورتلاندى عادى	زلط	٠,٢٤٤	٠,٢٣٧	٠,٢٣١	٠,٢٢٤	٠,٢١٦
- أسمنت مقاوم للكبريتات	زلط	٠,٢٥١	٠,٢٤٥	٠,٢٣٨	٠,٢٣١	٠,٢٢٣
- أسمنت فائق النعومة	زلط	٠,٢٦٦	٠,٢٥٩	٠,٢٥١	٠,٢٤٤	٠,٢٣٦
- أسمنت بورتلاندى عادى	دولوميت	٠,٢٦٢	٠,٢٥٦	٠,٢٤٩	٠,٢٤٢	٠,٢٣٥
- أسمنت مقاوم للكبريتات	دولوميت	٠,٢٧١	٠,٢٦٤	٠,٢٥٧	٠,٢٥٠	٠,٢٤٢
- أسمنت فائق النعومة	دولوميت	٠,٢٨٦	٠,٢٧٩	٠,٢٧٢	٠,٢٦٤	٠,٢٥٦

١٠- **يتم تطبيق معادلة الحجم المطلق** بنفس الطريقة المتبعة سابقاً فى حالة الخرسانة عادية المقاومة وذلك لحساب أوزان المكونات المختلفة فى المتر المكعب من الخرسانة مع مراعاة فرض قيم الأوزان النوعية للمواد المختلفة إذا لم تتوافر بيانات عنها كما يلى:

الأسمنت = ٣,١٥ غبار السليكا = ٢,١٥ الملدنات = ١,١٥

الزلط والرمل = ٢,٦٥ الدولوميت = ٢,٧ الجرانيت = ٢,٧

مثال:

المطلوب تصميم خلطة خرسانية عالية المقاومة وتحديد الكميات اللازمة لعمل واحد متر مكعب من الخرسانة إذا علم أن:

- **مقاومة الضغط المطلوبة = ٨٠٠ كج/سم٢**
- **الهبوط بإستخدام المخروط القياسى = ١٠ سم**
- **نوع الأسمنت المستخدم هو أسمنت مقاوم للكبريتات**
- **الركام المستخدم عبارة عن رمل طبيعى حرش و دولوميت مقاس ١٤مم ، والتدرج الحبيبى لكلٍ من الرمل والدولوميت كما يلى:**

فتحة المنخل - مم	٢٠	١٠	٤,٧٥	٢,٣٦	١,١٨	٠,٦	٠,٣	٠,١٥
دولوميت	١٠٠	٨٥	٦	-	-	-	-	-
رمـــل	-	١٠٠	٩٤	٨٠	٦٥	٥٠	١٠	صفر

تصميم الخلطة

١- نسبة غبار السليكا المناظر لمقاومة ٨٠٠ كج/سم٢ مع استخدام الدولوميت = ١٠% من وزن الأسمنت.

٢- محتوى الأسمنت المناظر لنسبة ١٠% من غبار السليكا = ٤٧٥ كج/م٣.

∴ وزن غبار السليكا = ٤٧٥ × ١٠% = ٤٧,٥ كج/م٣.

٣- نسبة الملدنات المطلوبة = ٣% من وزن المواد الأسمنتية وتكون من النوع ASTM-Type G

∴ وزن الملدنات فى المتر المكعب = ٠,٠٣ × (٤٧٥ + ٤٧,٥) = ١٥,٦٧٥ كج

٤- بتطبيق معادلة *w/cm* مع مراعاة أن قيمة α = ١٥ وقيمة β = ١٢ نحصل على نسبة الماء إلى المواد الأسمنتية = ٠,٢٩٤

∴ وزن الماء فى المتر المكعب = ٠,٢٩٤ (٤٧٥ + ٤٧,٥) = ١٥٣,٦ كج

٥- يتم خلط الركام الكبير مع الركام الصغير بحيث يحقق أن ٣٠% من وزن الركام الخليط يمر خلال المنخل رقم ٤,٧٥. إذن بإستخدام النتائج فى جدول التدرج نجد أن:

٠,٩٤ وزن الرمل + ٠,٠٦ وزن الدولوميت = ٠,٣٠ (وزن الرمل + وزن الدولوميت)

∴ وزن الرمل = ٠,٣٧٥ وزن الدولوميت.

٦- بتطبيق معادلة الحجم المطلق:

$$\frac{475}{3.15}+\frac{47.5}{2.15}+\frac{0.375\ W}{2.65}+\frac{W}{2.7}+\frac{15.675}{1.15}+\frac{153.6}{1.0}=1000$$

حيث W هى وزن الدولوميت.

بحل المعادلة نحصل على وزن الدولوميت = ١٢٨٩ كج

∴ وزن الرمل = ١٢٨٩ × ٠,٣٧٥ = ٤٨٣ كج

٧- و يكون وزن المكونات المختلفة اللازمة لعمل واحد متر مكعب خرسانة هى:

- **وزن الأسمنت المقاوم للكبريتات = ٤٧٥ كج**
- **وزن غبار السليكا = ٤٧,٥ كج**
- **وزن الدولوميت = ١٢٨٩ كج**
- **وزن الرمل = ٤٨٣ كج**
- **وزن الملدنات ASTM C494 Type G = ١٥,٦٧٥ كج**
- **وزن الماء = ١٥٣,٦ كج**

٥-٦ بعض الخلطات الخرسانية ذات المتطلبات الخاصة

Concrete Mixes With Special Requirements

قد يكون مطلوباً فى بعض الأحيان تصميم خلطة خرسانية لها خواص معينة أو تحقق شروطاً معينة تكون ضرورية من الناحية التصميمية أو التنفيذية فمثلاً قد يطلب أن تكون الخلطة ذات مقاومة عالية أو أن يكون لها قوام إنسيابى أو أن تحتفظ الخلطة بقوامها اللدن لمدة طويلة (قد تصل إلى ساعتين). والأمثلة الآتية هى نتائج معملية لبعض الخلطات التى تم تنفيذها فى معامل كلية الهندسة بالمنصورة.

الخلطة رقم ١

المطلوب:

- مقاومة الضغط = ٤٠٠ كج/سم^{٢}.
- يشترط عدم إستخدام أية إضافات.
- الهبوط فى حدود ١٠ سم.

الخلطة المقترحة:

- أسمنت بورتلاندى عادى ٥٠٠ كج/م^{٣}.
- نسبة الماء إلى الأسمنت = ٠,٤٣ (٢١٥ لتر ماء فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الرمل إلىالزلط = ٠,٣٥ : ٠,٦٥ (رمل حرش وزلط مقاس ١٦ مم).

النتائج:

- الهبوط = ١٠ سم.
- مقاومة الضغط بعد ٧ أيام = ٣٢٢ كج/سم^{٢}.
- مقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم = ٤٠٥ كج/سم^{٢}.
- مقاومة الضغط بعد ٥٦ يوم = ٤٢٧ كج/سم^{٢}.

الخلطة رقم ٢

المطلوب:

- مقاومة الضغط = ٤٠٠ كج/سم٢.
- يمكن إستخدام إضافات.
- الهبوط فى حدود ١٠ سم ويستمر بدون فقد لمدة ساعة على الأقل.

الخلطة المقترحة:

- أسمنت بورتلاندى عادى ٤٥٠ كج/م٣.
- نسبة الماء إلى الأسمنت = ٠,٢٦ (١١٧ لتر ماء فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الرمل إلىالزلط = ٠,٣٥ : ٠,٦٥ (رمل حرش وزلط مقاس ١٦ مم).
- إستخدام ٣% ملدنات ASTM type G.

النتائج:

- الهبوط الأولى = ١٤ سم - الهبوط بعد ساعة = ١٠ سم.
- مقاومة الضغط بعد ٧ أيام = ٣٧٥ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم = ٤٤٥ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٥٦ يوم = ٤٩٠ كج/سم٢.

الخلطة رقم ٣

المطلوب:

- مقاومة الضغط = ٦٠٠ كج/سم٢.
- الهبوط فى حدود ٨ سم ويستمر بدون فقد لمدة ساعة على الأقل.

الخلطة المقترحة:

- أسمنت بورتلاندى عادى ٥٠٠ كج/م٣.
- نسبة الماء إلى الأسمنت = ٠,٣٠ (١٥٠ لتر ماء فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الرمل إلى الدولوميت=٠,٣٥ : ٠,٦٥ (رمل حرش ودولوميت مقاس ١٦ مم).
- إستخدام ٤% ملدنات ASTM type G.

النتائج:

- الهبوط الأولى = ١٢ سم - الهبوط بعد ساعة = ٩ سم.
- مقاومة الضغط بعد ٧ أيام = ٥٥٠ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم = ٧٠٠ كج/سم٢.

- مقاومة الضغط بعد ٥٦ يوم = ٧٤٧ كج/سم٢.

الخلطة رقم ٤

المطلوب:

- مقاومة الضغط = ٥٠٠ كج/سم٢.
- الهبوط فى حدود ٨ سم.

الخلطة المقترحة:

- أسمنت بورتلاندى عادى ٤٥٠ كج/م٣.
- نسبة الماء إلى الأسمنت = ٠,٣٢ (١٤٤ لتر ماء فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الرمل إلىالزلط = ٠,٣٥ : ٠,٦٥ (رمل حرش وزلط مقاس ١٦ سم).
- إستخدام ٣% ملدنات ASTM type G.

النتائج:

- الهبوط = ٨ سم
- مقاومة الضغط بعد ٧ أيام = ٤٦٠ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم = ٥٥٠ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٥٦ يوم = ٥٧٥ كج/سم٢.

الخلطة رقم ٥

المطلوب:

- مقاومة الضغط = ٨٠٠ كج/سم٢.
- الهبوط فى حدود ٥ سم.

الخلطة المقترحة:

- أسمنت بورتلاندى عادى ٥٠٠ كج/م٣.
- غبار السليكا ١٥% من وزن الأسمنت (٧٥ كج فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الماء إلى الأسمنت = ٠,٢٥ (١٢٥ لتر ماء فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الرمل = ٢٥% من الركام الشامل.
- دولوميت مقاس ١٠ مم = ٢٥% من الركام الشامل.
- دولوميت مقاس ١٦ مم = ٥٠% من الركام الشامل.
- إستخدام ٣,٥% ملدنات ASTM type G.

النتائج:

- الهبوط = ٥ سم

- مقاومة الضغط بعد ٧ أيام = ٧١٠ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم = ٨٥٠ كج/سم٢.

الخلطة رقم ٦

المطلوب:

- مقاومة الضغط = ٢٠٠ كج/سم٢.
- الهبوط فى حدود ١٠ سم.

الخلطة المقترحة الأولى بدون إضافات:

- أسمنت بورتلاندى عادى ٢٧٠ كج/م٣.
- نسبة الماء إلى الأسمنت = ٠,٧٠ (١٨٩ لتر ماء فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الرمل إلىالزلط = ٠,٣٥ : ٠,٦٥ (رمل حرش وزلط مقاس ١٦ سم).

النتائج:

- الهبوط = ١٠ سم
- مقاومة الضغط بعد ٧ أيام = ١٢٥ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم = ٢٢٠ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٥٦ يوم = ٢٣٠ كج/سم٢.

الخلطة المقترحة الثانية بإستخدام إضافات:

- أسمنت بورتلاندى عادى ٢٠٠ كج/م٣.
- نسبة الماء إلى الأسمنت = ٠,٥٩ (١١٨ لتر ماء فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الرمل إلىالزلط = ٠,٣٥ : ٠,٦٥ (رمل حرش وزلط مقاس ١٦ سم).
- إستخدام ٣% ملدنات ASTM type G.

النتائج:

- الهبوط = ١٠,٥ سم
- مقاومة الضغط بعد ٧ أيام = ١٥٥ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم = ٢٠٥ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٥٦ يوم = ٢٢٠ كج/سم٢.

****

الباب السادس

ضبط جودة الخرسانة إحصائيا

Statistical Quality Control

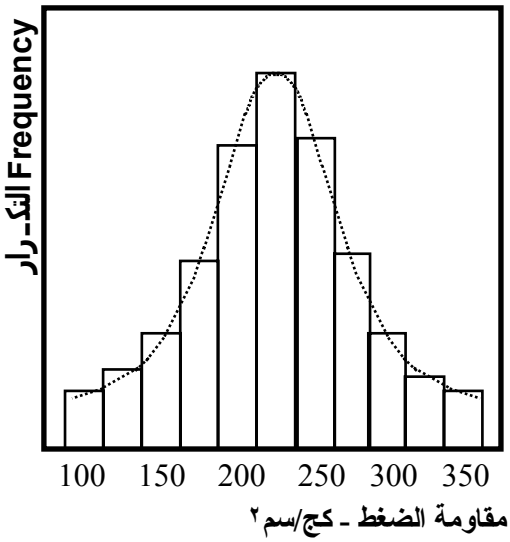
٦-١ التغير فى مقاومة الخرسانة

غالباً فإن مقاومة الخرسانة المنتجة فى الموقع تكون متغيرة من خلطة إلى خلطة وأيضا خلال الخلطة الواحدة. ويرجع هذا التغير إلى عوامل عديدة منها:

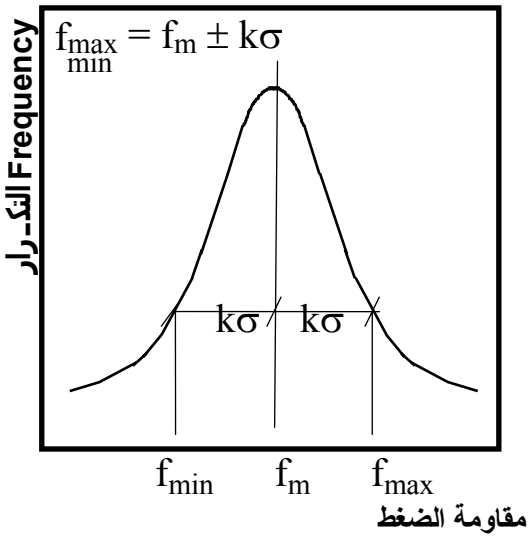
١- إختلاف جودة وخواص المكونات (أسمنت - ركام - ماء - إضافات).
٢- التغير فى نسبة الماء بالخلطة.
٣- التغير فى خطوات صناعة الخرسانة (طريقة الخلط - النقل - الصب - الدمك - المصنعية).
٤- التغير فى درجة الحرارة أو عملية المعالجة.
٥- التغير نتيجة أخطاء فى صناعة قوالب الصب.
٦- وجود أخطاء أثناء الإختبار (سرعة الماكينة - عدم مركزية العينة - الماكينة غير معايرة).

٦-٢ منحنى التوزيع التكرارى

الغرض من ضبط جودة الخرسانة إحصائيا هو تحليل النتائج للوقوف على مدى تجانس وجودة الخرسانة و مطابقتها للمواصفات. فعندما يكون عندنا عدد كبير من النتائج (مقاومة الضغط) فإنه يكون من المفيد تنظيم مجموعة البيانات على شكل توزيع تكرارى (هيستوجرام) كما فى شكل(٦-١) حيث يمثل المحور الأفقى قيمة المقاومة (عبارة عن فترات فاصلة) ويمثل المحور الرأسى عدد العينات (التكرار) عند كل مقاومة معينة.



شكل (٦-١) هيستوجرام التكرار



شكل (٦-٢) منحنى التوزيع التكراري

عندما يصل عرض الفترة إلى قيمة صغيرة جداً (≅ صفر) ويكون عدد العينات كبيرجداً (∞ ≅) فإن:

⇩

الهيستوجرام يتحول إلى منحنى يعرف بإسم منحنى التوزيع التكراري Distribution Curve.

وعندما تكون النتائج على أبعاد متساوية من القيمة المتوسطة و يكون أكبر عدد من العينات له قيمة مساوية للمتوسط فإن:

⇩

التوزيع يكون طبيعى ويعرف المنحنى بإسم منحنى التوزيع التكرارى الطبيعى Normal Distribution Curve ويكون شكله على شكل الجرس Bell Shape كما فى شكل (٦-٢). وخصائص منحنى التوزيع التكرارى الطبيعى تعتمد على قيمتى المتوسط (f_m) والإنحراف المعيارى (σ).

$$f_{\substack{max \\ min}} = f_m \pm k\,\sigma$$

حيث k هى معامل الإحتمالات ويعبر عن إحتمال وقوع مقاومة معينة خارج الحدود ($f_m \pm k\,\sigma$) و σ هى الإنحراف المعيارى. أما f_m فتمثل القيمة المتوسطة. وقيمة الانحراف المعياري تعرف على أنها جذر متوسط مربع قيمة الإنحرافات

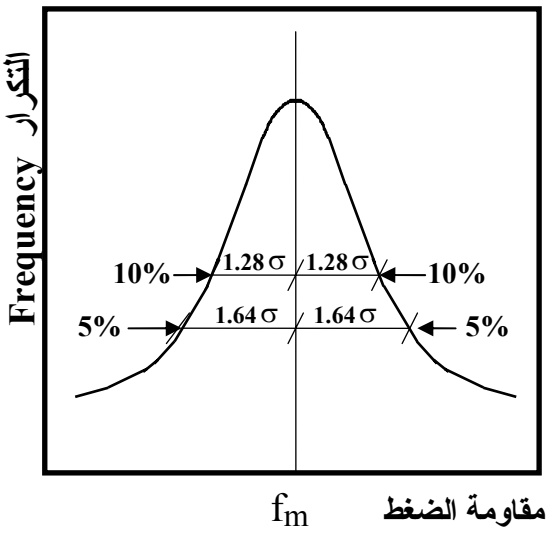
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x-\bar{x})^2}{n-1}} \qquad n > 20$$

or

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x-\bar{x})^2}{n}} \qquad n \le 20$$

جدول(٦-١) قيمة معامل الإحتمالات

k	احتمال وقوع مقاومة معينة خارج ($f_m \pm k\,\sigma$)	احتمال وقوع مقاومة معينة خارج ($f_m - k\,\sigma$)
٣,١	%٠,٢	%٠,١
٢,٣٣	%٢	%١
١,٦٤	%١٠	%٥
١,٢٨	%٢٠	%١٠
١,٠	%٣١,٨	%١٥,٩



شكل (٦-٣) خصائص منحنى التوزيع الطبيعى.

٦-٣ المقاومة المتوسطة والمقاومة المميزة

٦-٣-١ المقاومة المميزة (رتبة الخرسانة) Characteristic Strength (f_{cu})

هى قيمة إجهاد كسر المكعب الخرسانى القياسى الذى من غير المحتمل أن يقل عنه أكثر من ٥% من عدد نتائج إختبارات تحديد المقاومة أثناء التنفيذ (درجة ثقة=٩٥%). والمقاومة المميزة هى المقاومة التى يجرى على أساسها المهندس الإنشائى حساباته.

٦-٣-٢ متوسط المقاومة المستهدف Target Mean Strength (f_m)

تصمم خلطة الخرسانة بتحديد محتويات مكوناتها بحيث يكون متوسط المقاومة المستهدف مساويا لمجموع المقاومة المميزة (f_{cu}) مضافاً إليه هامش أمان (M) يكفل الحصول على المقاومة المميزة المطلوبة $f_m = f_{cu} + M$.

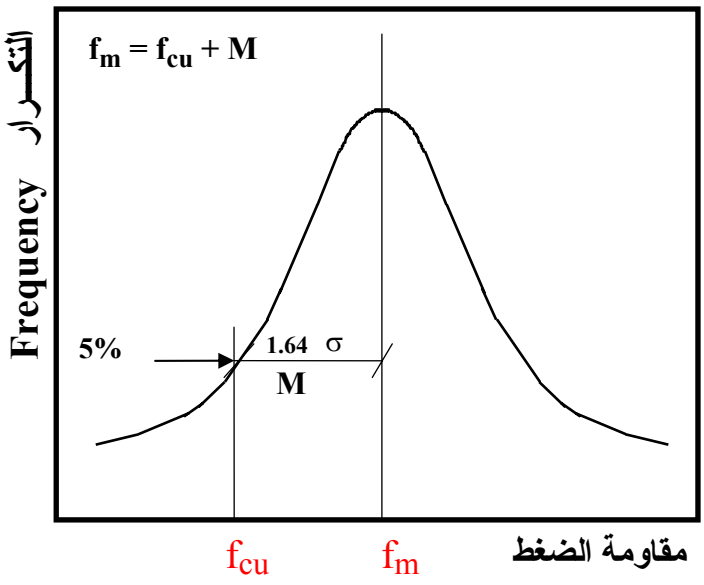
ويمكننا تخيل قيمة (f_m) ، (f_{cu}) على منحنى التوزيع التكرارى كما يلى:

* فى حالة أن يكون مطلوب درجة ثقة Confidence ٩٥% فإن $k = 1.64$ ويكون

$$f_m = f_{cu} + 1.64\ \sigma$$

* فى حالة أن يكون مطلوب درجة ثقة Confidence ٩٠% فإن $k = 1.28$ ويكون

$$f_m = f_{cu} + 1.28\ \sigma$$



شكل (٦-٤) المقاومة المميزة والمقاومة المتوسطة.

٦-٤ مستويات التحكم فى الجودة

استخدم الانحراف المعياري (σ) كمقياس لدرجة ضبط الجودة للخرسانة حيث أنه كلما زادت قيمة σ دل ذلك على ضعف التحكم فى الجودة والعكس صحيح ويمثل جدول (٦-٢) قيم σ المناظرة لدرجة التحكم فى الجودة:

جدول (٦-٢) مستويات التحكم فى جودة الخرسانة طبقا لمعهد أبحاث الخرسانة الأمريكى.

درجة التحكم	ممتازة	جيدة جداً	جيدة	مقبولة	رديئة
σ كج/سم٢	أقل من ٢٨	٢٨-٣٥	٣٥-٤٢	٤٢ - ٤٩	أكبر من ٤٩

ونظراً لأن قيمة الإنحراف المعيارى تعتمد على قيمة المقاومة فقد وُجد أنها تكون كبيرة نسبيا فى حالة الخرسانة عالية المقاومة وبالتالى يكون من الأفضل إستخدام معامل الإختلاف (v) بدلاً من الإنحراف المعيارى (σ) فى تحديد مستوى التحكم فى الجودة كما فى جدول (٦-٣).

$$v = \frac{\sigma}{f_m}$$

$$f_m = f_{cu} + k\, v\, f_m \quad \rightarrow \quad f_{cu} = f_m\,(1-kv)$$

$$f_m = \frac{f_{cu}}{1 - kv}$$

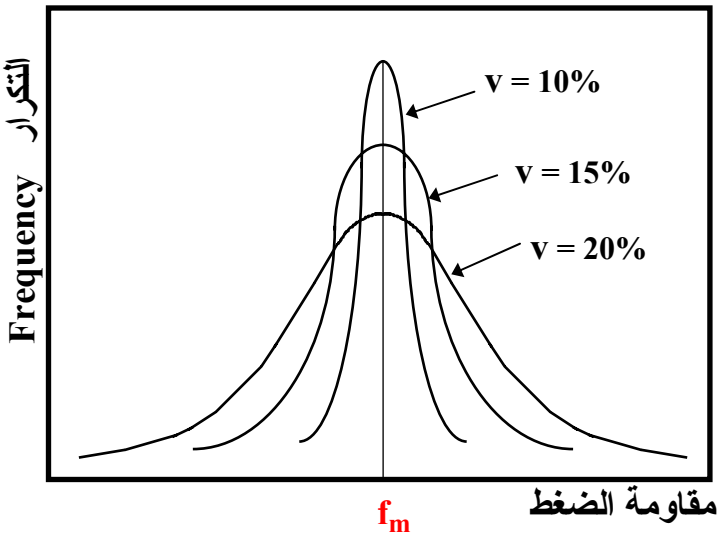
فإذا كانت درجة الثقة ٩٥ % فإن قيمة k تكون ١,٦٤.
أما إذا كانت درجة الثقة ٩٠ % فإن قيمة k تكون ١,٢٨.

تدريب: أحسب كلاً من قيمتى الإنحراف المعيارى (σ) ومعامل الإختلاف (v) للمجموعتين الآتيتين وعلق على النتائج.

المجموعة الأولى خرسانة تقليدية: ٢٠٠ ، ٢١٠ ، ٢٢٠ كج/سم٢
المجموعة الثانية خرسانة عالية المقاومة: ١٠٠٠ ، ١٠٥٠ ، ١١٠٠ كج/سم٢

جدول (٦-٣) مستويات التحكم فى جودة الخرسانة طبقا لقيمة معامل الإختلاف.

درجة التحكم	ممتازة	جيدة	مقبولة	ضعيفة
v %	أقل من ١٠	١٠ - ١٥	١٥ - ٢٠	أكبر من ٢٠



شكل (٦-٥) تأثير معامل الإختلاف على شكل منحنى التوزيع.

ومن الجدير بالذكر أن شكل منحنى التوزيع التكرارى يتأثر كثيراً نتيجة التغير فى قيمة معامل الإختلاف (v) حيث يزداد تدبباً كلما قل التغير فى قيمة مقاومة الضغط وبالتالى قلت قيمة (v) كما بالشكل (٦-٥).

٦-٥ الحكم على نتيجة إختبار الخرسانة

وعموماً فإن الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية قد أعتبر الخرسانة مستوفية لرتبة الخرسانة المميزة المطلوبة أثناء التنفيذ إذا تحقق مايلى:

١- إذا كان عدد مكعبات الضغط للخرسانة أكثر من ٢٠ عينة فيشترط أن لا تزيد عدد نتائج اختبارات المكعبات التى تقل عن المقاومة المميزة المطلوبة على قراءة واحدة لكل عشرين قراءة (٥٪) كما يشترط أن لا يزيد الفرق بين أكبر قراءة وأصغر قراءة (المدى) على ٢٥٪ من متوسط جميع القراءات.

٢- إذا كان عدد مكعبات الضغط للخرسانة أقل من ٢٠ مكعب فيشترط أن لا تقل أية نتيجة إختبار عن المقاومة المميزة المطلوبة كما يشترط أن لا يزيد الفرق بين أكبر قراءة وأصغر قراءة (المدى) على ٢٥٪ من متوسط جميع القراءات.

٦- ٦ تطبيـــقات

٦-٦-١ تصميم الخلطة الخرسانية اللازمة لمشروع جديد

هنا يكون المطلوب هو حساب قيمة المقاومة المتوسطة f_m التى تحقق قيمة معينة للمقاومة المميزة f_{cu} (بمعنى قيمة المقاومة التى من المحتمل أن لا يقل عنها إلا نسبة معينة) وذلك بدلالة درجة التحكم المتوقع فى الجودة.

مثال ١: أحسب المقاومة المتوسطة المطلوبة لتصميم خلطة خرسانية إذا كانت قيمة المقاومة المميزة التى صُمم عليها المشروع هى ٢٥٠ كجم/سم^2 (لا يقل عنها أكثر من ٥٪ من النتائج) وذلك فى حالتى ورجة تحكم فى الجودة جيدة ومقبولة.

الحـــــــل

أ- حالة تحكم جيدة (v=0.125)

$$f_m = \frac{f_{cu}}{1-1.64v} = \frac{250}{1-1.64\ (0.125)} = 314.5\ \ kg/cm^2$$

ب- حالة تحكم مقبولة (v=0.175)

$$f_m = \frac{f_{cu}}{1-1.64v} = \frac{250}{1-1.64\ (0.175)} = 350.6\ \ kg/cm^2$$

٦-٦-٢ تعيين قيمة المقاومة المميزة

إذا كانت قيمة المقاومة المتوسطة لعدد من العينات معروفة عند درجة معينة من التحكم فى الجودة فما هى قيمة المقاومة المميزة التى يتم تصميم المشروع إنشائياً عليها (التى يتوقع أن لايقل عن قيمتها إلا نسبة معينة من النتائج).

مثال ٢ : إذا كان متوسط مقاومة الضغط لخلطة خرسانية هو ٢٧٥ كجم/سم^2 وكان الإنحراف المعيارى مساوياً ٢٠ كجم/سم^2. فما هى قيمة المقاومة التى يتوقع أن لايقل عن قيمتها أكثر من ١٠٪ من النتائج (٩٠٪ ورجة ثقة).

الحـــــــل

$$f_{cu} = f_m\ (1-kv) \qquad \text{or} \qquad f_{cu} = f_m - k\ \sigma$$

فى حالة درجة ثقة ٩٠% فإن قيمة k تساوى ١,٢٨

$$f_{cu} = 275 - 1.28\ (20) = 249.4\ kg/cm^2$$

٦-٦-٣ الحكم على صلاحية خرسانة منشأ

يمكن الحكم على صلاحية خرسانة منشأ قائم بالفعل وذلك بحساب قيمة التغير فى مقاومة الضغط (التى يمكن قياسها بإستخدام الإختبارات غير المتلفة مثل مطرقة شميدت) وحساب المقاومة التى تحقق درجة ثقة ٩٥% ثم مقارنتها بقيمة المقاومة المميزة التى تم التصميم عليها بالفعل وبالتالى الحكم بقبول أو رفض الخرسانة.

مثال ٣ : عند الحكم على صلاحية خرسانة اللبشة العلوية لمدرسة ابتدائية بالدقهلية تم قياس مقاومة الضغط لعدد ١٧ مكعب مختلف وكانت المقاومة كما يلى:

٢١٨ - ١٨٤ - ١٧٧ - ٢١٥ - ١٨٦ - ١٧٣ - ٢٠٩ - ١٤٢ - ١٥٣ - ١٨٧ ١٨١ - ١٩٣ - ١٤٧ - ٢١٣ - ٢٣١ - ٢٠٠ - ٢٢١.

فما هى قيمة المقاومة الفعلية للخرسانة (ورجة ثقة ٩٥٪) وهل تُقبل الخرسانة أم تُرفض إذا كانت المقاومة المميزة التى تم التصميم على أساسها هى ٢٠٠ كج /سم٢ ؟

الحـــــل

ابتداء فإن الخرسانة مرفوضة ولا تحقق الشروط التى صُممت من أجلها وذلك لوجود أكثر من نتيجة قيمتها أقل من قيمة المقاومة المميزة التى تم التصميم على أساسها وهى ٢٠٠ كج /سم٢ وذلك ضمن عدد عينات أقل من عشرين عينة. أما لحساب قيمة المقاومة الفعلية للمجموعة فينبغى حساب قيمة الإنحراف المعيارى كمايلى:

المفردات	الإنحراف	مربع الإنحراف
٢١٨	٢٨+	٧٨٤
١٨٤	٦-	٣٦
١٧٧	١٣-	١٦٩
٢١٥	٢٥+	٦٢٥
١٨٦	٤-	١٦
١٧٣	١٧-	٢٨٩
٢٠٩	١٩+	٣٦١
١٤٢	٤٨-	٢٣٠٤
١٥٣	٣٧-	١٣٦٩
١٨٧	٣-	٩
١٨١	٩-	٨١
١٩٣	٣+	٩
١٤٧	٤٣-	١٨٤٩
٢١٣	٢٣+	٥٢٩
٢٣١	٤١+	١٦٨١
٢٠٠	١٠+	١٠٠
٢٢١	٣١+	٩٦١
المتوسط =١٩٠	**صفر**	**المجموع= ١١١٧٢**

$$\sigma = \sqrt{\frac{11172}{17}} = 25.6 \ \text{kg/cm}^2$$

$$v = 25.6\ (100) / 190 = 13.5\ \%$$

$$f_{cu} = f_m\ (1\text{-}kv)$$

$$f_{cu} = 190\ (1\text{-}1.64 \times 0.135)$$
$$= 147.9\ \text{kg/cm}^2 < 200$$

∴ الخرسانة ترفض ويمكن إعادة حسابات التصميم على أساس مقاومة مميزة ١٤٧,٩ فقط بدلا من ٢٠٠ كج/سم٢.

٦-٧ التحليل الإحصائى لمجموعة البيانات المفردة

٦-٧-١ مقاييس المركزية

أ - المتوسط Average

$$\overline{X} = \frac{\sum x}{n}$$

مميزاته : هو أكثر المقاييس شيوعاً - سهل الفهم - يأخذ جميع البيانات فى الإعتبار.
عيوبه : يتأثر بالقيم المتطرفة.

مثال : ١٩ ، ٢٠ ، ٢١ ⇐ المتوسط = ٢٠
٤ ، ١٩ ، ٢٠ ، ٢١ ⇐ المتوسط = ١٦
١٩ ، ٢٠ ، ٢١ ، ٧٦ ⇐ المتوسط = ٣٤

ب- الوسيط Median

هو القيمة التى عندها عدد البيانات الأقل منها يساوى عدد البيانات الأكبر منها أو هو قيمة الحد الذى ترتيبة $(\frac{N+1}{2})$.

مميزاته : لا يتأثر بالقيم المتطرفة - يمكن فهمه بسهولة.
عيوبه : يحتاج إلى ترتيب البيانات تنازلياً أو تصاعدياً حتى يمكن حسابه .

مثال : ٩ ، ٥ ، ١٠ ، ١٢ ، ١٥ ⇐ الوسيط = ١٠
١٣ ، ١٧ ، ١١ ، ١٩ ، ١٠ ⇐ الوسيط = ١٣

ج- المنوال Mode

المنوال هو القيمة الأكثر تكراراً فى المجموعة.

مميزاته : لا يتأثر بالقيم المتطرفة - يمكن فهمة بسهولة (مثل الوسيط).
عيوبه: فى كثير من الأحيان لا يوجد منوال حيث لا يتكرر العدد أكثر من مرة وفى حالات أخرى يكون هناك أكثر من منوال.

٢-٧-٦ مقاييس التشتت

أ - المدى = القيمة القصوى - القيمة الصغرى.

ب- الانحراف المعياري (σ) هو الجذر التربيعى لمتوسط مربع إنحراف المفردات عن المتوسط .

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}}$$

و الانحراف المعياري له نفس وحدات المفردات ويتأثر بقيم المفردات.

ج- معامل الإختلاف هو مقياس للتشتت النسبى أو الإنحراف النسبى.

$$v = \frac{\sigma}{\bar{X}}$$

مثال : احسب قيم v , σ للمجموعتين الآتيتين:

١- خرسانة معتادة ٢٠٠ ، ٢١٠ ، ٢٢٠ كج/سم٢.

٢- خرسانة عالية المقاومة ١٠٠٠ ، ١٠٥٠ ، ١١٠٠ كج/سم٢.

الحـــــــل

المجموعة الأولى: المتوسط = (٢٠٠ + ٢١٠ + ٢٢٠) ÷ ٣ = ٢١٠ كج/سم٢

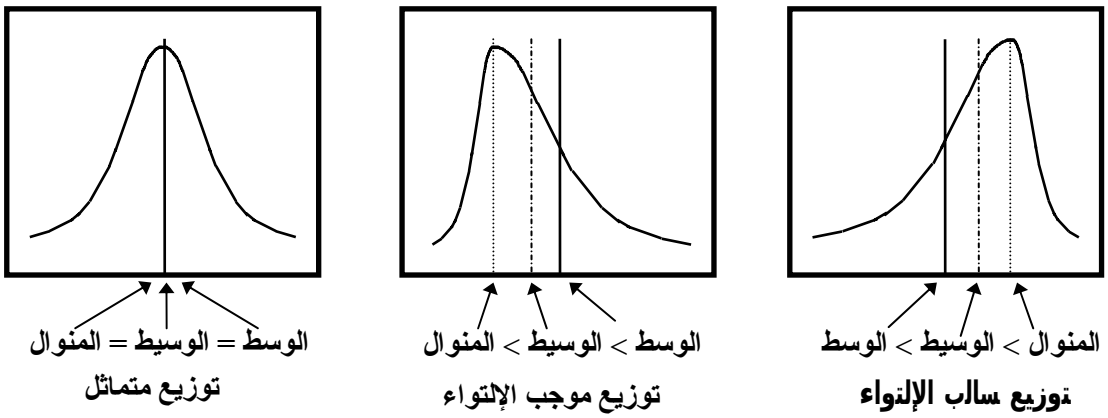
$$\sigma = \sqrt{\frac{(10)^2 + (-10)^2 + (0)^2}{3}} = 8.16 \ \text{kg/cm}^2$$

$$v = \frac{8.16}{210} \text{ x } 100 = 3.89 \ \%$$

المجموعة الثانية: المتوسط = (١٠٠٠ + ١٠٥٠ + ١١٠٠) ÷ ٣ = ١٠٥٠ كج/سم٢

$$\sigma = \sqrt{\frac{(50)^2 + (-50)^2 + (0)^2}{3}} = 40.82 \ \text{kg/cm}^2$$

$$v = \frac{40.82}{1050} \text{ x } 100 = 3.89 \ \%$$



شكل (٦-٦) أشكال الإلتواء المختلفة

٦-٧-٣ أشكال التوزيعات التكرارية

أ- الإلتواء : يكون الإلتواء صفراً إذا كان التوزيع متماثل حول الوسط الحسابى

ويكون التوزيع موجب الإلتواء عندما يكون الوسط < الوسيط < المنوال

ويكون التوزيع سالبا الإلتواء عندما يكون الوسط > الوسيط > المنوال

$$\text{معامل الإلتواء} = \frac{٣\,(\text{المتوسط} - \text{الوسيط})}{\sigma}$$

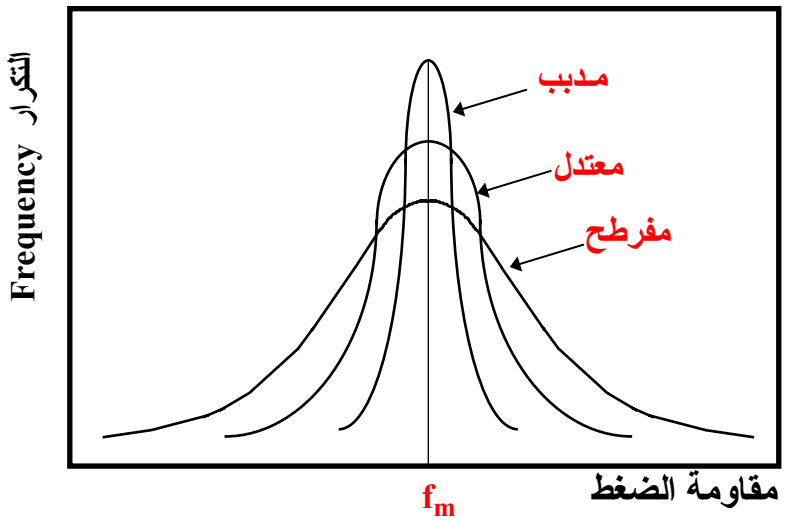
ب - التفرطح

$$\text{معامل التفرطح} = \frac{\sum (x - \bar{x})^4}{\sigma^4}$$

معامل التفرطح للتوزيع المعتدل = ٣

" " " المفرطح > ٣

" " " المدبب < ٣



شكل (٦-٧) أشكال التوزيعات التكرارية من حيث التفرطح.

مثال : أحسب قيم المدلولات التى يمكن منها تقييم نتائج مقاومة الضغط للمجموعات التالية
من عينات الخرسانة : المجموعة الأولى (٤١٠ - ٤١٢ - ٣٩٥ - ٤١٥ كج/سم٢)
المجموعة الثانية (٣٨٥ - ٤٠٢ - ٣٠٥ - ٥٤٠ كج/سم٢)
ثم احسب قيمة المقاومة التى تحقق درجة ثقة ٩٠٪ بالنسبة للمجموعة الثانية.

الحـــــــل

	المجموعة الأولى	المجموعة الثانية
المفردات مرتبة	٣٩٥ ، ٤١٠ ، ٤١٢ ، ٤١٥	٣٠٥ ، ٣٨٥ ، ٤٠٢ ، ٥٤٠
المتوسط كج/سم٢	٤٠٨	٤٠٨
المدى كج/سم٢	٢٠ (٤,٩% من المتوسط)	٢٣٥ (٥٧,٦% من المتوسط)
الإنحرافات كج/سم٢	- ١٣، +٢ ، +٤ ، +٧	-١٠٣ ، -٢٣ ، -٦ ، ١٣٢
الإنحراف المعيارى كج/سم٢	٧,٧	٨٤,٦
معامل الإختلاف %	١,٩	٢٠,٧
درجة التحكم فى الجودة	ممتازة	رديئة
المقاومة المميزة كج/سم٢	٣٩٥	٢٦٩

القيمة التى تعطى درجة ثقة ٩٠% فى المجموعة الثانية:

$$f_{cu} = f_m (1 - kv) = 408 (1 - 1.28 * 0.207) \cong 300 \ kg/cm^2$$

****

٦-٨ توزيع البيانات

إذا كان عندنا مجموعة من البيانات كثيرة العدد نسبياً ومطلوب إستخلاص المدلولات الفنية والحكم على هذه المجموعة ومدى تجانسها فإنه يمكن توزيعها على هيئة شرائح أو فئات بإتباع الخطوات الآتية:

١- نوجد المدى الذى يقع داخلة جميع القراءات (المدى = أكبر قيمة - أقل قيمة)
٢- نحدد عرض الشريحة الذى يجعل عدد الشرائح دائما = ١٠ ± ٢

عدد الشرائح = $\frac{\text{المدى}}{\text{عرض الشريحة}}$ + ١	أو عرض الشريحة = $\frac{\text{المدى}}{\text{عدد الشرائح - ١}}$

مثال: إذا كان المدى = ١٦٠ كج/سم^{٢} فإن عرض الشريحة = ١٦٠ ÷ (عدد الشرائح - ١)
إذن ممكن نأخذ عدد الشرائح = ٩ وعرضها ٢٠ كج/سم^{٢}
أو نأخذ عدد الشرائح = ١١ وعرضها ١٦ كج/سم^{٢}

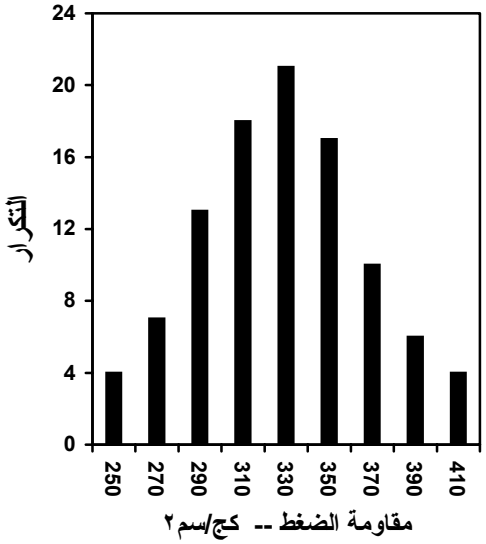
أما إذا كان المدى = ١٦٣ كج/سم٢ ففى هذه الحالة يمكننا توزيع الـ ٣ فى أول شريحة وآخر شريحة بمعنى أننا عندنا شريحة زيادة دائما لمثل هذه الفروق (نضع نصف شريحة فى الأول ونصف شريحة فى النهاية) وسنرى ذلك فى مثال شامل فيما بعد.

٣- نعمل جدول مختصر وفية نضع جميع الأرقام على صورة شرائح أو فئات

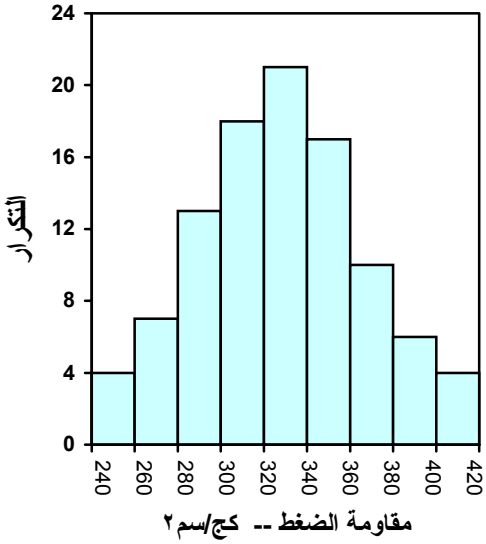
رقم الشريحة	حدود الشريحة	المتوسط	التكرار
١	٢٤٥ - ٢٥٥	٢٥٠	٤
٢	٢٥٥ - ٢٦٥	٢٦٠	٦
:	:	:	:
:	:	:	:
٩	٣٢٥ - ٣٣٥	٣٣٠	٢

٤- يترجم الجدول السابق إلى الرسومات البيانية الآتية:

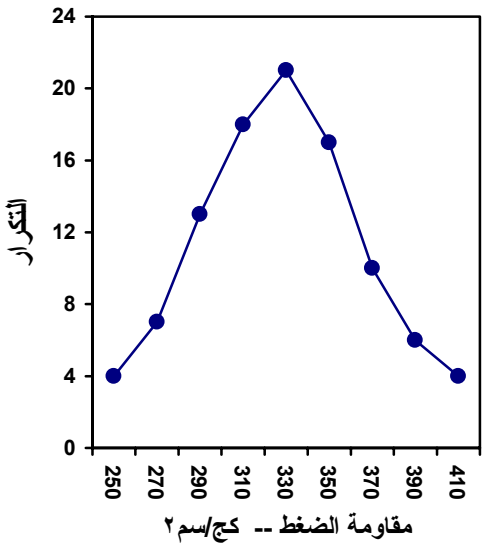
أ - لوحة قضبان التكرار (بين المتوسط والتكرار)
ب- مضلع التكرار أو المنحنى التكرارى (,, ,, ,,)
ج- هيستوجرام التكرار (بين حدود الشريحة والتكرار)
د- المنحنى التكرارى التجميعى (,, ,, ,, ,, ,,)



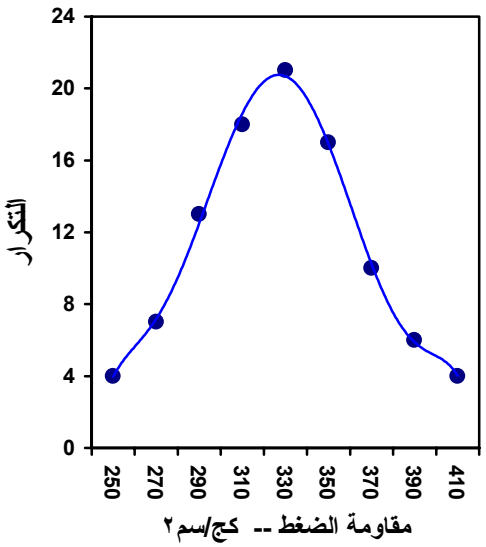
أ- لوحة قضبان التكرار



ب- هيستوجرام التكرار

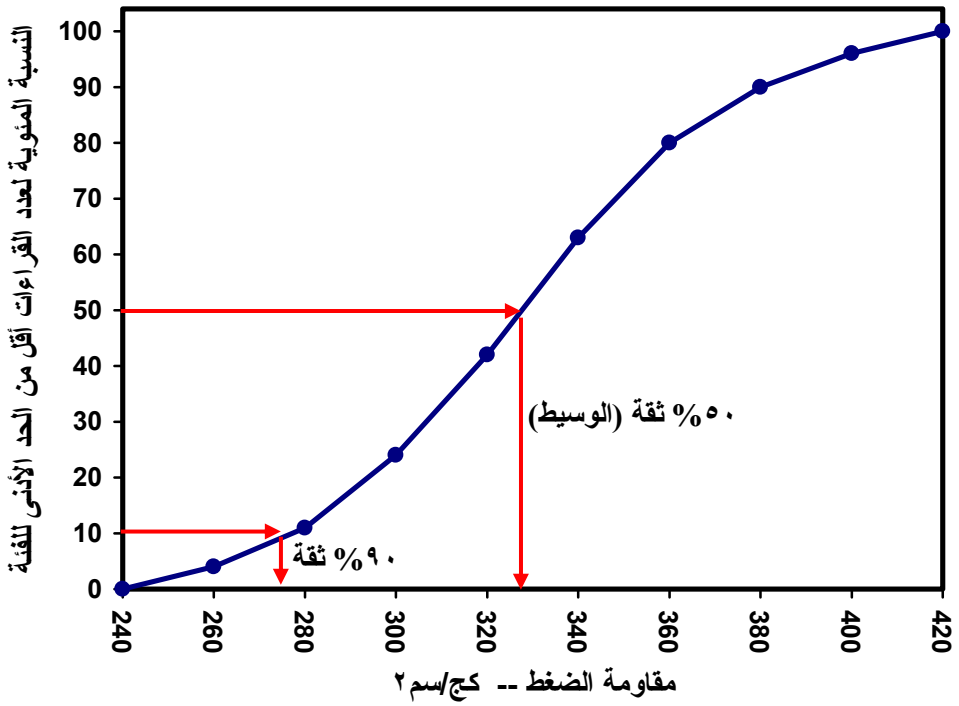


ج- مضلع التكـــرار



د- المنحنى التكـــراري

شكل (٦-٨) الأشكال البيانية المختلفة للتوزيعات التكرارية.



شكل (٦-٩) المنحنى التكرارى التجميعى.

مثال: إذا كان لدينا عدد ٢٥٠ قراءة لمقاومة الضغط وكان أقل القراءات هو ٢٥١ كج/سم٢ وأكبرها ٣٤٨ كج/سم٢ حدد عدد الشرائح المناسب وحدود أول شريحة وآخر شريحة حتى يمكننا تحليلها إحصائيا.

الحـــــل

$$\text{عدد الشرائح} = \frac{\text{المـــدى}}{\text{عرض الشريحة}} + ١$$

المدى = ٣٤٨ - ٢٥١ = ٩٧ كج/سم٢

هنا نفترض جدلاً أن المدى = ١٠٠ بدلاً من ٩٧ وذلك فى حالة تنظيم الشرائح فقط .

بمعنى أن المدى = (٣٥٠-٢٥٠) بحيث نضع أى فرق فى نصف الشريحة الأولى ونصف الشريحة الأخيرة.

$$\text{عدد الشرائح} = \frac{١٠٠}{\text{عرض الشريحة}} + ١$$

∴ نأخذ عرض الشريحة = ١٠ كج/سم٢ والعدد = ١١ شريحة

- بداية أول شريحة = أصغر قيمة (مفترضة) - نصف عرض شريحة
= ٢٥٠ - ٥ = ٢٤٥ كج/سم^{٢}
∴ حدود الشريحة الأولى = ٢٤٥ إلى ٢٥٥

- نهاية الشريحة الأخيرة = أكبر قيمة (مفترضة) + نصف عرض شريحة
= ٣٥٠ + ٥ = ٣٥٥ كج/سم^{٢}
∴ حدود الشريحة الأخيرة = ٣٤٥ إلى ٣٥٥

****

مثال: لضبط جودة خرسانة صهريج مياه أخذت عينات من الخرسانة أثناء مراحل التنفيذ وإختبرت مقاومة الضغط للعينات القياسية فكانت وفقا للجدول الآتى:

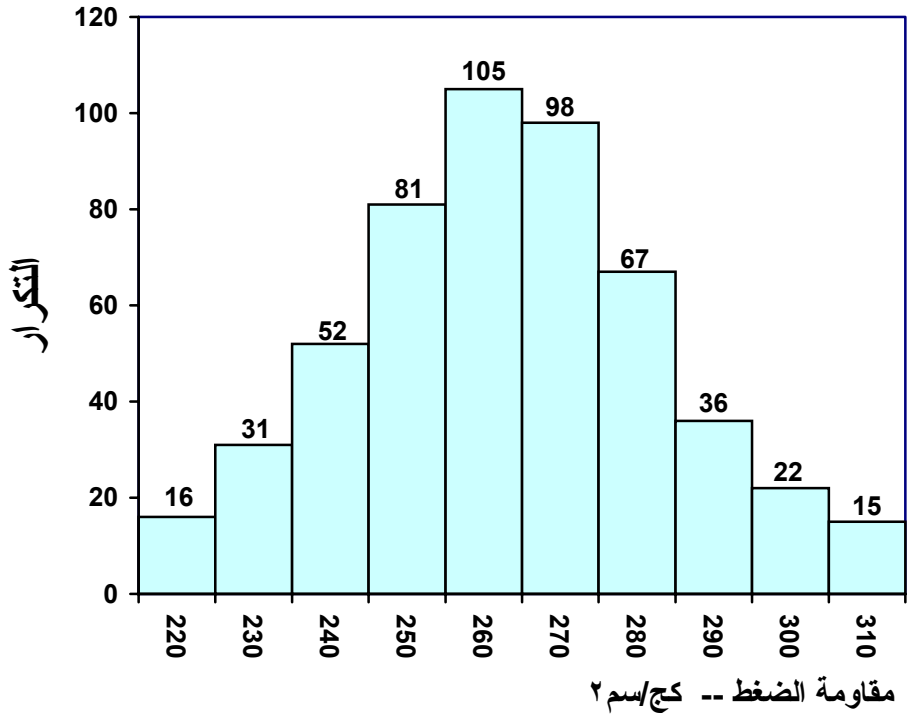
رقم الفئة	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧	٨	٩	١٠
حدود الفئة كج/سم^{٢}	٢١٥ ٢٢٥	٢٢٥ ٢٣٥	٢٣٥ ٢٤٥	٢٤٥ ٢٥٥	٢٥٥ ٢٦٥	٢٦٥ ٢٧٥	٢٧٥ ٢٨٥	٢٨٥ ٢٩٥	٢٩٥ ٣٠٥	٣٠٥ ٣١٥
التكـــرار	١٦	٣١	٥٢	٨١	١٠٥	٩٨	٦٧	٣٦	٢٢	١٥

إرسم كلاً من هيستوجرام التكرار ومنحنى التكرار التجميعى ومنحنى التوزيع التكرارى ثم إستخلص المدلولات التى يمكن منها معرفة مستوى إنتاج هذه الخرسانة ومدى إنتظامها ودرجة جودتها. إحسب أيضا قيمة المقاومة عند درجة ثقة ٩٠% ، ٩٥%.

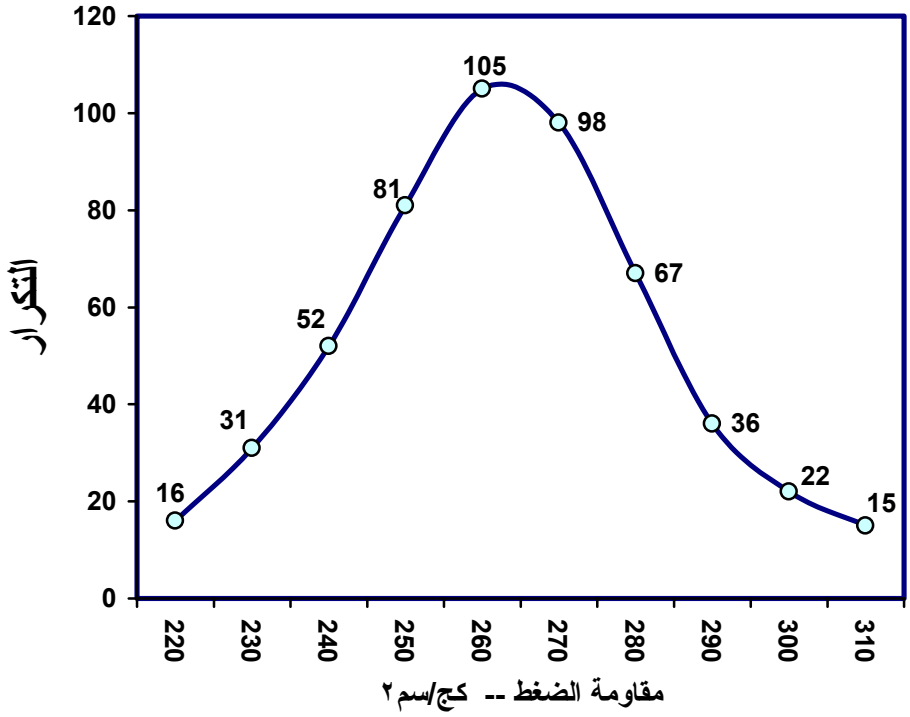
الحـــــل

أولاً نكون الجدول الآتى:

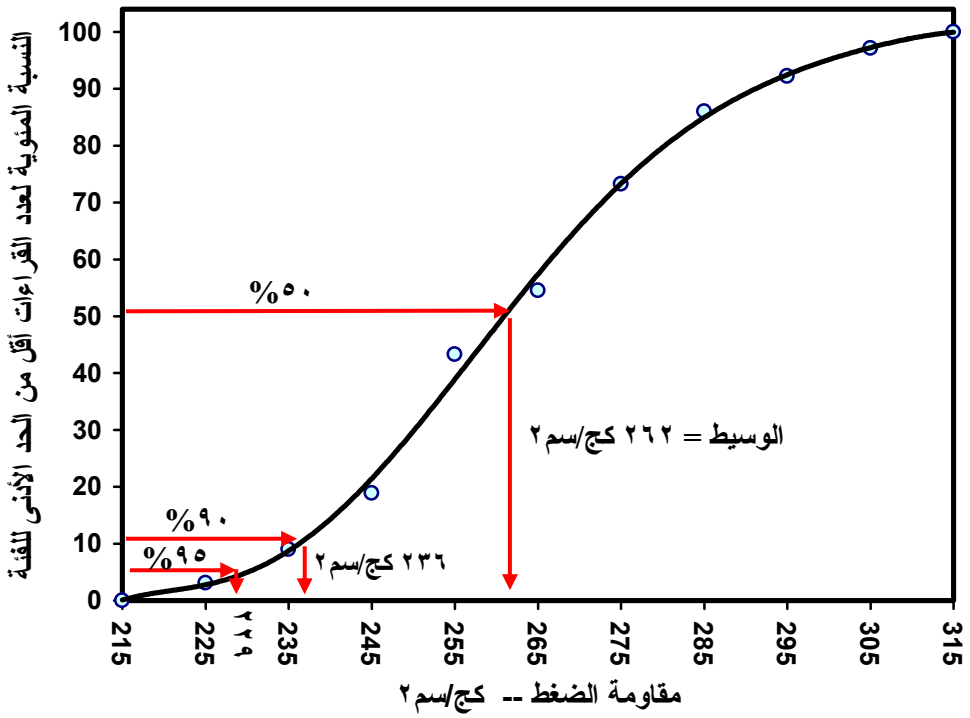
الحد الأدنى للشريحة	٢١٥	٢٢٥	٢٣٥	٢٤٥	٢٥٥	٢٦٥	٢٧٥	٢٨٥	٢٩٥	٣٠٥	٣١٥
عدد القراءات أقل من الحد الأدنى	صفر	١٦	٤٧	٩٩	١٨٠	٢٨٥	٣٨٣	٤٥٠	٤٨٦	٥٠٨	٥٢٣
عدد القراءات %	صفر	٣,١	٩	١٨,٩	٤٣,٣	٥٤,٥	٧٣,٢	٨٦,٠	٩٢,٢	٩٧,١	١٠٠



هيستوجرام التكرار



المنحنى التكراري.



منحنى التوزيع التكراري التجميعى.

ثانياً مقاييس المركزية:

١- المتوسط $\overline{X} = \frac{\sum nx}{N}$

حيث X **متوسط الفئة**
n **تكرار الفئة**
N **العدد الكلى للعينات**

$$= \frac{220x16 + 230x31 + \ldots\ldots\ldots\ldots + 310x15}{523} = ٢٦٣,٠٨ \text{ كج/ سم}^٢$$

٢- الوسيط = ٢٦٢ كج/سم٢ (من منحنى التكرار التجميعى)

٣- المنوال = ٢٦٠ كج/سم٢ (من جدول التكرار أو هيستوجرام التكرار)

ومن هنا يتضح أن المنحنى موجب الإلتواء حيث أنه يميل قليلاً جداً ناحية القيم الأقل من المتوسط.

ثالثاً مقاييس التشتت:

١- الانحراف المعيارى $\sigma = \sqrt{\frac{\sum n(x-\bar{x})^2}{N-1}}$

$$\sigma = \sqrt{\frac{16(220-263.8)^2+31(230-263.8)^2+.....+15(310-263.8)^2}{523-1}} = 20.5 \text{ kg/cm}^2$$

٢- معامل الإختلاف = الانحراف المعياري / المتوسط = ٢٠,٥ × ١٠٠ / ٢٦٣,٠٨ = ٧,٧٩ %

إذن طبقا لتقييم ACI فإن التحكم فى ضبط الجودة ممتاز

رابعاً حساب قيمة المقاومة التى تعطى درجة ثقة معينة تحليليا وبيانيا:

أ- تحليلياً:

- درجة ثقة ٩٠%

$f_{cu} = f_m (1 - kv) = 263.08 (1 - 1.28 * 0.0779) = 236.85 \text{ kg/cm}^2$

- درجة ثقة ٩٥%

$f_{cu} = f_m (1 - kv) = 263.08 (1 - 1.64 * 0.0779) = 229.47 \text{ kg/cm}^2$

ب- بيانياً:

من منحنى التكرار التجميعى

f_{cu} (90%) ≅ 236 kg/cm^2

f_{cu} (95%) ≅ 229 kg/cm^2

وبصفه عامة فإنة طبقا للتقييم بكل من σ ، v فإن درجة التحكم فى الجودة تعتبر ممتازة حيث الإنحراف المعيارى (σ) أقل من ٢٨ كج/سم٢ و معامل الإنحراف (v) أقل من ١٠%.

أما عن مدى إنتظام النتائج فيوجد التواء خفيف جداً فى المنحنى ناحية القيم الأقل من المتوسط.

****

الباب العاشر

الإنكماش و الزحف

Shrinkage & Creep

١٠-١ الإنكماش Shrinkage

تعريف

الانكماش هو خاصية من خواص الخرسانة التى تتصلد فى الهواء. ولايسبب الإنكماش مشاكل إلا إذا كان هناك قيداً على الحركة حيث يسبب إجهادات شد داخل الخرسانة مما يؤدى إلى تشرخها ويمكن التقليل من الآثار الضارة للإنكماش عن طريق:

أ - المعالجة الصحيحة والمبكرة للخرسانة	Effective Curing
ب- عمل وصلات حركة	Movement Joints
ج- وضع أسياخ تسليح لمقاومة الإنكماش	Shrinkage Reinforcements

أسباب حدوث الانكماش

يحدث الانكماش فى الخرسانة نتيجة:

أ- هبوط الأجزاء الصلبة فى الخلطة وفقد الماء الحر من الخرسانة الطازجة مما يسبب ما يعرف بإسم الإنكماش اللدن.

ب- الإتحاد الكيميائى بين الأسمنت والماء يؤدى إلى حدوث الإنكماش الذاتى.

ج - جفاف الخرسانة نتيجة فقد الماء يسبب حدوث إنكماش الجفاف.

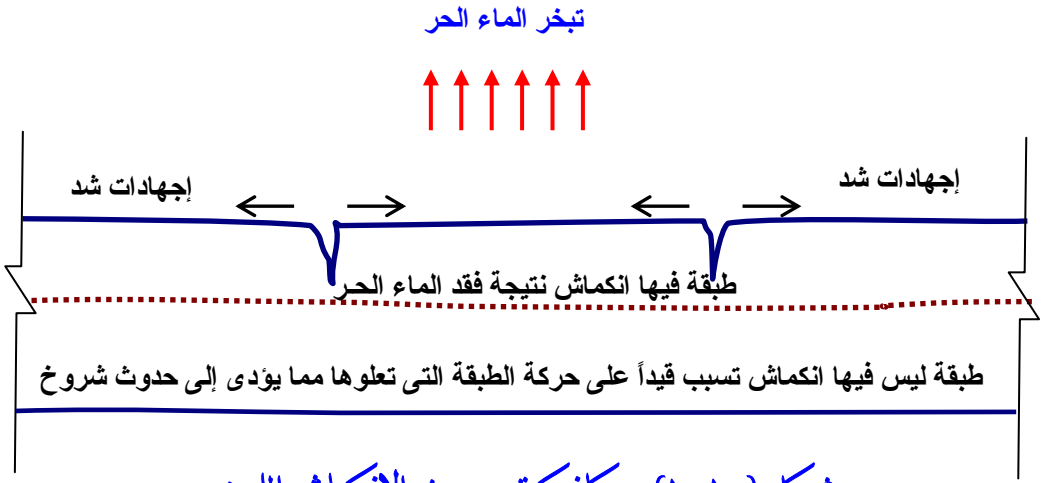
أنواع الانكماش

يوجد ثلاثة أنواع من الإنكماش هى:

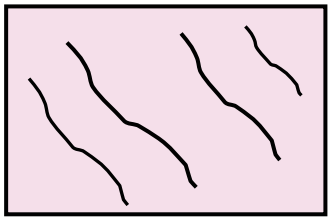
أ- الانكماش اللدن	Plastic Shrinkage
ب- الإنكماش الذاتى	Autogenous Shrinkage
ج- الإنكماش بالجفاف	Drying Shrinkage

أولاً: الإنكماش اللدن Plastic Shrinkage

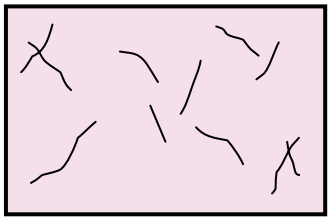
يحدث الانكماش اللدن قبل تصلد الخرسانة خلال بضعة ساعات من صب الخرسانة وسببه هو فقد الماء الحر من الخلطة وهبوط الأجزاء الصلبة (الركام) إلى أسفل مما يؤدى إلى صعود الماء إلى أعلى وتبخره. فعندما يكون معدل تبخر الماء من سطح الخرسانة أسرع من معدل الإدماء (نزوح الماء إلى سطح الخرسانة) يحدث الإنكماش اللدن (شكل ١٠-١). ولذلك فإن الإنكماش اللدن يُلاحظ أكثر فى البلاطات والأعضاء ذات المساحه السطحية الكبيرة المعرضة للجو الحار أو الرياح. ويؤدى هذا النوع من الإنكماش إلى حدوث شروخ سطحية بالخرسانة. ويمكن منع شروخ الإنكماش اللدن بتقليل الفاقد من الماء السطحى عن طريق المعالجة المبكرة والفعالة. وتشرخ الخرسانة اللدنة عادة يأخذ إحدى صور ثلاث كما فى شكل (١٠-٢).



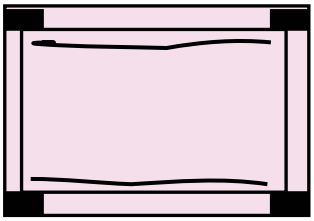
شكل (١٠-١) ميكانيكية حدوث الانكماش اللدن.



شروخ قطرية مائلة بالنسبة لحروف البلاطة وتكون المسافة بين هذه الشروخ من ٢٠ إلى ٢٠٠ سم.



شروخ موزعة توزيعاً غير منتظم ولا تصل إلى الحروف الحرة للبلاطة.



شروخ تتبع شكل توزيع حديد لتسليح أو التغير فى عمق القطاع الخرسانى.

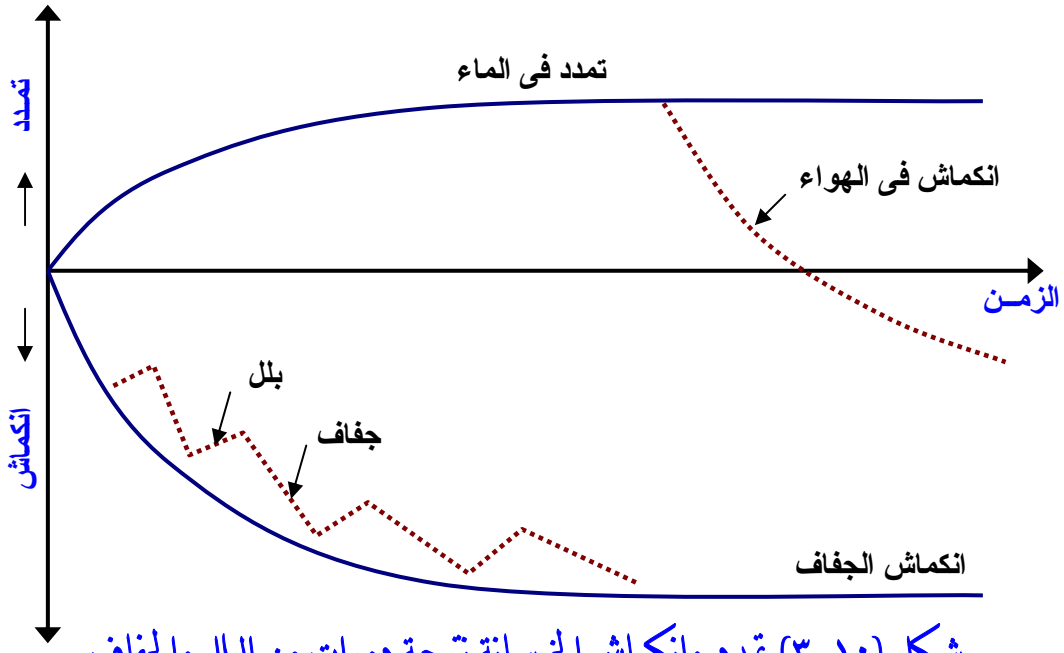
شكل (١٠-٢) أشكال الإنكماش اللدن.

ثانياً: الإنكماش الذاتي Autogenous Shrinkage

عندما تبدأ عملية الإماهة Hydration بين الأسمنت والماء يحدث نقص فى حجم المونة لأن المونة المتصلدة حجمها أقل من مجموع حجمى الماء والأسمنت فى الخلطة مما يؤدى إلى إنكماش الخرسانة الداخلية وهو ما يعرف بالإنكماش الذاتى لأنه يحدث ذاتياً نتيجة الإتحاد الكيميائى بين الأسمنت والماء. أما إذا تمت معالجة الخرسانة تحت الماء فإن الماء الداخل فى التفاعل يتم إستعاضته من الماء الخارجى وتمتص العجينة الأسمنتية ماءً زائداً مما يؤدى إلى زيادة طفيفة فى حجم الخرسانة وليس إنكماشاً كما فى شكل (١٠-٣). أما الخرسانة التى تعالج فى الهواء أو تترك بدون معالجة فلايتم إستعاضة الماء الداخل فى التفاعل ولكن على العكس يُسحب الماء من العجينة المتصلدة ويحدث إنكماشاً إضافياً هو إنكماش الجفاف. والإنكماش الذاتى يتأثر بعدة عوامل منها : التركيب الكيميائى للأسمنت - كمية الماء فى الخلطة ودرجة الحرارة وقد تصل قيمة الإنكماش الذاتى إلى ١٠٠×١٠^{-٦} (٠,١مم لكل متر) ويحدث ٧٥ % منه فى الشهور الثلاثة الأولى من عمر الخرسانة.

ثالثا: إنكماش الجفاف Drying Shrinkage

عندما تتعرض الخرسانة المتصلدة - المعالجة فى الماء - للجفاف فإنها تفقد أولاً الماء الموجود فى الفجوات والشقوق الشعرية الداخلية ولا تبدأ فى الإنكماش إلا إذا إستمر الجفاف بحيث تفقد الماء الموجود بالعجينة المتصلدة ذاتها وهو ما يعرف بالإنكماش نتيجة الجفاف وقد تصل قيمة هذا الإنكماش إلى ١٥٠٠×١٠^{-٦} ومن أهم وظائف الركام فى الخلطة تقليل إنكماش مونة الأسمنت. والإنكماش بالجفاف يبدأ بمعدلات عالية ويستمر لمدة طويلة ولكن بمعدل يتناقص بإستمرار. ويمكن إفتراض أن نصف الانكماش الكلى نتيجة الجفاف يحدث فى السنة الأولى.



شكل (١٠-٣) تمدد وإنكماش الخرسانة نتيجة دورات من البلل والجفاف.

العوامل التى تؤثر على إنكماش الجفاف

١- مكونات الخلطة

بصفة عامة فإن الإنكماش يتناسب طردياً مع كمية الماء بالخلطة ويتناسب عكسياً مع كمية الركام بها كما بشكل (١٠-٤).

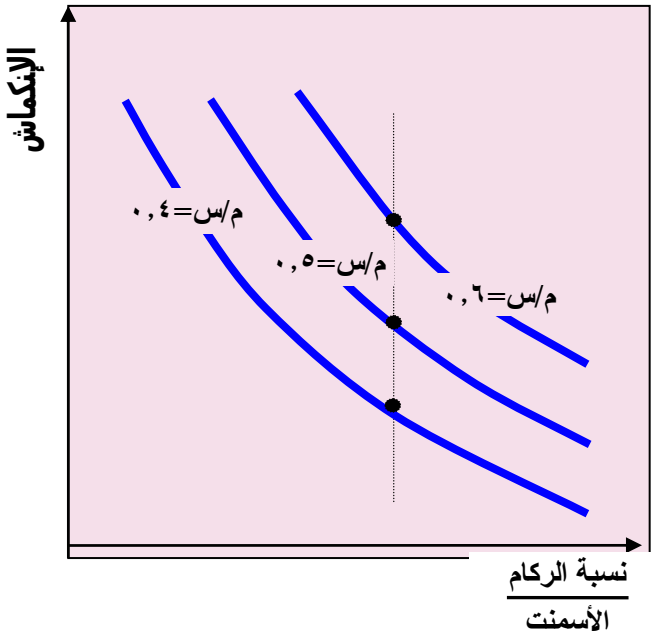
المـــاء: يحدث الإنكماش نتيجة فقد الماء إلى الجو المحيط. فكلما كان هناك ماء أكثر متاح للتبخر كلما زادت إمكانية الإنكماش أثناء الجفاف.

الأسمنت: أهمية الأسمنت بالنسبة للإنكماش ترجع فقط إلى أن كميته ونعومته تؤثر على كمية الماء فى الخلطة.

الركام: كلما زادت كمية الركام كلما زاد تأثير الركام على تقليل الإنكماش لمونة الأسمنت. كذلك فإن إستعمال الركام ذى مساحة سطحية أقل ما يمكن يساعد على تقليل محتوى الماء فى الخلطة وبالتالى يعمل على تقليل الإنكماش.

٢- معالجة الخرسانة

تعمل معالجة الخرسانة على تقليل الفاقد الحرارى وبالتالى تقليل فروق الحرارة فى الأعضاء الضخمة كما أنها فى نفس الوقت تقلل الفاقد من ماء الخرسانة وبالتالى تبطئ من معدل الإنكماش فى فترة المعالجة مما يقلل من إحتمالات التشرخ.



شكل (١٠-٤) تأثير الماء والركام على الإنكماش.

٣- حجم وشكل العضو الخرسانى

حيث أن الجفاف (فقد الرطوبة) يكون من سطح العينة فإن ذلك يعنى أنه كلما زادت المساحة السطحية لكل وحدة كتلة كلما زاد معدل إنكماش العضو. فالعضو الضخم السميك يستطيع الإحتفاظ بكمية من الماء أكبر من تلك التى تستطيع بلاطة رفيعة الإحتفاظ بها. وبالتالى يكون تأثير الإنكماش كبيراً وخطيراً فى حالة البلاطات وخاصة الرقيقة منها. ويمكن التعبير عن حجم العضو الخرسانى ومساحته السطحية بما يسمى بالبعد الإعتبارى للقطاع B الذى يقدر كما يلى:

$$B = 2Ac / Pc$$

حيث:

B = البعد الإعتبارى للقطاع - مم

Ac = مساحة المقطع الخرسانى - مم٢.

Pc = محيط المقطع الخرسانى المعرض للجفاف - مم

جدول (١٠-١) يوضح بعض القيم الإسترشادية لإنفعال إنكماش الجفاف وذلك فى حدود درجة رطوبة نسبية بين ٤٠ و ٨٥%.

جدول (١٠-١) قيم إسترشادية لإنفعال إنكماش الجفاف (مليمتر/ متر).

حـــالة الجـــو	جو جاف (الرطوبة حوالى ٥٥%)			جو رطب (الرطوبة حوالى ٧٥%)		
العمر المعتبر عنده الإنكماش	البعد الإعتبارى للقطاع B - مم			البعد الإعتبارى للقطاع B - مم		
	B ≥ 600	600>B>200	B ≤ 200	B ≥ 600	600>B>200	B ≤ 200
٣ - ٧ أيام	٠,٣١	٠,٣٨	٠,٤٣	٠,٢١	٠,٢٣	٠,٢٦
٧ - ٦٠ يوم	٠,٣٠	٠,٣١	٠,٣٢	٠,٢١	٠,٢٢	٠,٢٣
أكثر من ٦٠ يوم	٠,٢٨	٠,٢٥	٠,١٩	٠,٢٠	٠,١٩	٠,١٦

٤- درجة الحرارة والرطوبة

كلما قلت نسبة الرطوبة كلما زاد معدل وكمية الفاقد من الماء إلى سطح الخرسانة مما يؤدى إلى زيادة الإنكماش ونفس التأثير يحدث عند زيادة درجة حرارة الجو.

٥- التسليح

تنكمش الخرسانة المسلحة بدرجة أقل من إنكماش الخرسانة العادية نظراً لأن صلب التسليح يسبب قيداً على الحركة. وعلى ذلك فوظيفة أسياخ الإنكماش ليست فقط مقاومة إجهادات الشد الناتجة من الإنكماش وإنما تقليل الإنكماش نفسه كذلك.

اختبار التغير الحجمى للخرسانة بالجفاف والرطوبة
Drying Shrinkage & Moisture Movement Tests

يجرى هذا الاختبار لتعيين قيمة التغير فى طول العينة الخرسانية نتيجة تعرضها للزيادة فى الحجم بتأثير الرطوبة أو للنقص فى الحجم بتأثير الإنكماش بالجفاف.

عينات الإختبار: تستخدم عينات منشورية بطول يتراوح من ١٥ إلى ٣٠ سم ومقطع مستعرض حوالى٥×٥ سم أو ٧,٥ ×٧,٥ سم ويثبت فى منتصف المقطع عند كل من النهايتين على محور العينة كرة من الصلب لإمكان إجراء عملية قياس الطول بدقة بين سطحى الكرتين.

أولاً: إختبار الإنكماش بالجفاف Drying Shrinkage

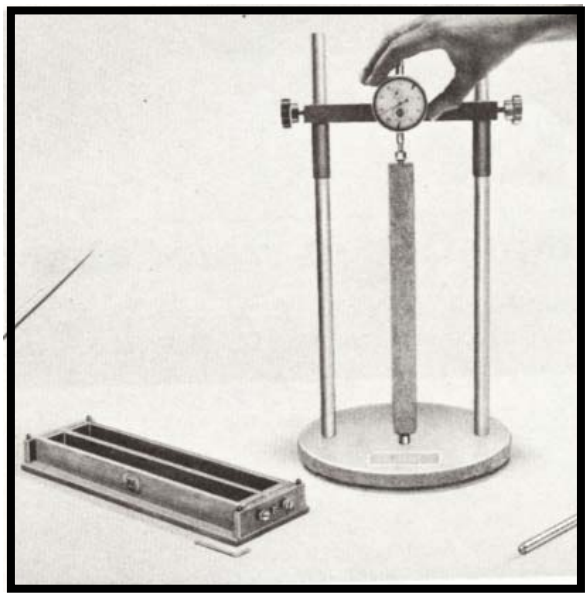
- طريقة إجراء هذا الإختبار هى أنه بعد رفع العينة من الماء (سواء كانت تعالج فى الماء بعد صبها أو كانت موضوعة فى الماء للتشبع بعد قطعها من الخرسانة ناضجة التصلد) يقاس طولها مباشرة بين الكرتين الصلب المثبتتين فى نهايتى العينة وذلك بتركيب العينة فى الجهاز المبين بشكل (١٠-٥) حيث يبين الميكرومتر أو مقياس التشكل قيمة التغير فى الطول المقاس عن طريق طول قياس معلوم لقضيب انفار Invar rod له طول مساو تقريبا لطول العينة وتكون دقة القياس لغاية ٠,٠٠٢٥ مم ثم يعين ذلك الطول الأولى الرطب للعينة L_1.
- تجفف العينة فى فرن درجة حرارته حوالى ٥٠ درجة مئوية وتكرر دورات التجفيف والتبريد وقياس الطول حتى تحصل على طول ثابت لا يتغير وتسجل القراءة النهائية L_2.
- يحسب انكماش الجفاف الأولى أو إنكماش الجفاف كنسبة مئوية كما يلى:

$$\text{Shrinkage } \% = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100$$

ثانياً: إختبار التمدد بالرطوبة Moisture Movement

تجفف العينة الخرسانية بنفس طريقة إختبار الإنكماش السابق ذكرها ويعين طولها الجاف الثابت وليكن L_3. تغمر العينة فى ماء درجة حرارته من ١٥ - ٢٠ م° بشرط أن يكون أحد الأوجه الكبيرة للعينة ظاهر تماما فوق سطح الماء. تترك العينة مغمورة لمدة ٤ أيام وبعدها ترفع من الماء ويقاس الطول النهائى الرطب للعينة وليكن L_4 يحسب قيمة التحرك بالرطوبة كنسبة مئوية كما يلى:

$$\text{Moisture Movement } \% = \frac{L_4 - L_3}{L_3} \times 100$$



شكل (١٠-٥) جهاز قياس التمدد والإنكماش.

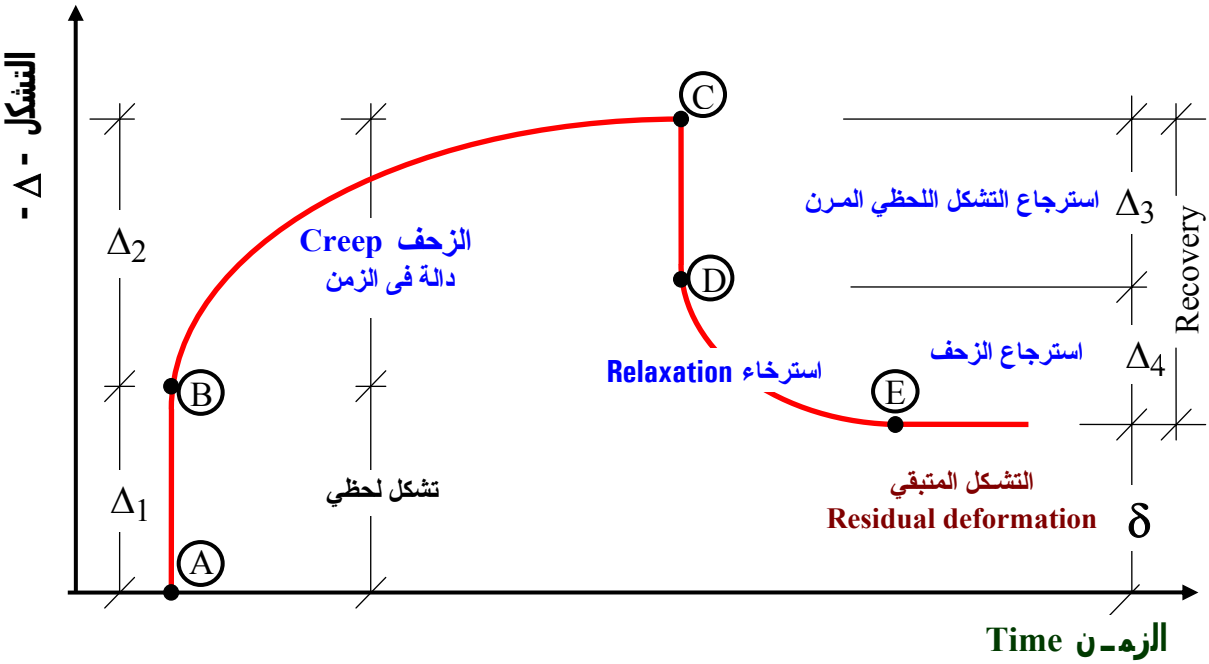
١٠-٢ الزحف Creep

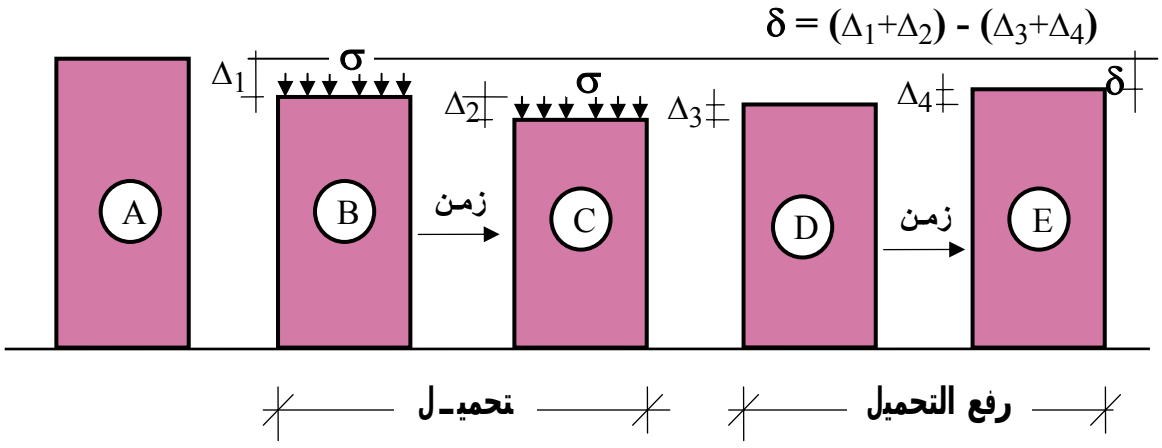
تعريف الزحف

هو الإنفعال غير المرن الذى يحدث مع مرور الزمن تحت تأثير إجهاد ثابت. أى أن الزحف يعتمد على الزمن Time-dependent وقد تصل قيمته إلى عدة أضعاف قيمة الإنفعالات اللحظية التى تحدث نتيجة أحمال التشغيل. الشكل (١٠-٦) يبين ميكانيكية حدوث الزحف.

- وقيمة الإنفعال الناتج من الزحف للخرسانة تتراوح من ٥ ×١٠-٦ إلى ٢٠ ×١٠-٦ وذلك لكل ١ كج/سم٢ إجهاد. ويمكن أخذ قيمة متوسطة للزحف الكلى للخرسانة على أساس ٠,٠١ مم *لكل متر لكل واحد كج/سم٢ إجهاد*. وبالتالى فإن إجهاداً للضغط مقداره ٣٠٠ كج/سم٢ يسبب زحفا مقداره ٠,٠٠٣ (أى أن عضواً طوله ١ متر إذا تعرض لإجهاد ثابت مقداره ٣٠٠ كج/سم٢ فإنه يحدث له تشكل مقداره ٣ مم نتيجة الزحف). ومن العوامل التى تؤثر على قيمة الزحف نوع الأسمنت المستخدم ومقاومة الخرسانة ونسبة الماء إلى الأسمنت فى الخلطة وكذلك الوقت الذى تم فيه أول تحميل للخرسانة وخواص المقطع الخرسانى وقيمة الرطوبة النسبية للجو المحيط بالمنشأ. وبصفة عامة فإن قيمة الزحف تقل كلما زادت مقاومة الخرسانة ، وقد وجد أن قيمة الزحف لخرسانة ذات مقاومة للضغط ٢٠٠كج/سم٢ يقدر بحوالى ١٨×١٠-٦ لكل ١كج/سم٢ إجهاد ، فى حين كانت قيمة الزحف المناظرة لخرسانة ذات مقاومة ٦٠٠ كج/سم٢ هى ٥×١٠-٦ فقط.

- يستمر الزحف مع الوقت فى الأعضاء المعرضة لأحمال ثابتة لسنوات عديدة ولكن معدل زيادة إنفعالات الزحف يقل حتى يصبح ضئيلا يمكن إهماله. وبالتقريب فإننا يمكننا أن نقول أن ربع قيمة الزحف الكلية تحدث فى أول شهر وأن نصف قيمة الزحف الكلية تحدث فى أول سنة. وأن قيمة الزحف بعد حوالى سبعة سنوات يزيد عن قيمة الزحف بعد عام بحوالى ٣٠% فقط. وتجدر الإشارة أن قيمة الزحف النهائى فى الشد تساوى تقريباً القيمة فى الضغط إلا أن معدل حدوث الزحف فى الشد يكون أسرع نسبياً من معدل حدوثه فى الضغط.





شكل (١٠-٦) ميكانيكية حدوث الزحف.

حساب قيمة الزحف

يمكن حساب القيمة الكلية للإنفعال الناتج عن أقصى زحف والإنفعال اللحظى المرن من المعادلة الآتية:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_o (1 + \varphi) = f_o (1 + \varphi) / E_c$$

حيث:

- ε_o = **الإنفعال اللحظى المرن الناتج عن التحميل الأولى ويساوى** f_o / E_c .
- ε_t = **الإنفعال الكلى عند زمن t.**
- φ = **معامل الزحف.**
- $\varphi\ \varepsilon_o$ = **إنفعال الزحف.**
- f_o = **إجهاد الخرسانة الإبتدائى عند التحميل.**
- E_c = **معاير مرونة الخرسانة عند عمر التحميل.**

وتؤخذ قيم معامل الزحف φ الإسترشادية من جدول (١٠-٢) وذلك بمعلومية الرطوبة النسبية للجو والبعد الإعتبارى للقطاع والعمر عند بدء التحميل.

جدول (١٠-٢) قيم إسترشادية لمعامل الزحف φ.

حـــالة الجـــو	جو جاف (الرطوبة حوالى ٥٥%)			جو رطب (الرطوبة حوالى ٧٥%)		
العمر المعتبر عنده التحميل	البعد الإعتبارى للقطاع B - مم			البعد الإعتبارى للقطاع B - مم		
	B ≥ 600	600>B>200	B ≤ 200	B ≥ 600	600>B>200	B ≤ 200
٣ - ٧ أيام	٢,٩٠	٣,٢٠	٣,٨٠	٢,١٠	٢,٤٠	٢,٧٠
٧ - ٦٠ يوم	٢,٥٠	٢,٨٠	٣,٠٠	١,٩٠	٢,٠٠	٢,٢٠
أكثر من ٦٠ يوم	٢,٠٠	١,٩٠	١,٧٠	١,٧٠	١,٦٠	١,٤٠

تأثـير الزحـف

لظاهرة الزحف فى الخرسانة تأثيرات ضارة وتأثيرات أخرى نافعة نوجزها فيما يلى:

التأثير الضار:

١- يزيد من قيمة الترخيم (Deflection) فى بعض الحالات.
٢- يعمل على توسيع الشروخ التى تنشأ من عوامل أخرى.
٣- زيادة الإنفعالات نتيجة الزحف قد يؤدى إلى تشريخ الخرسانة.

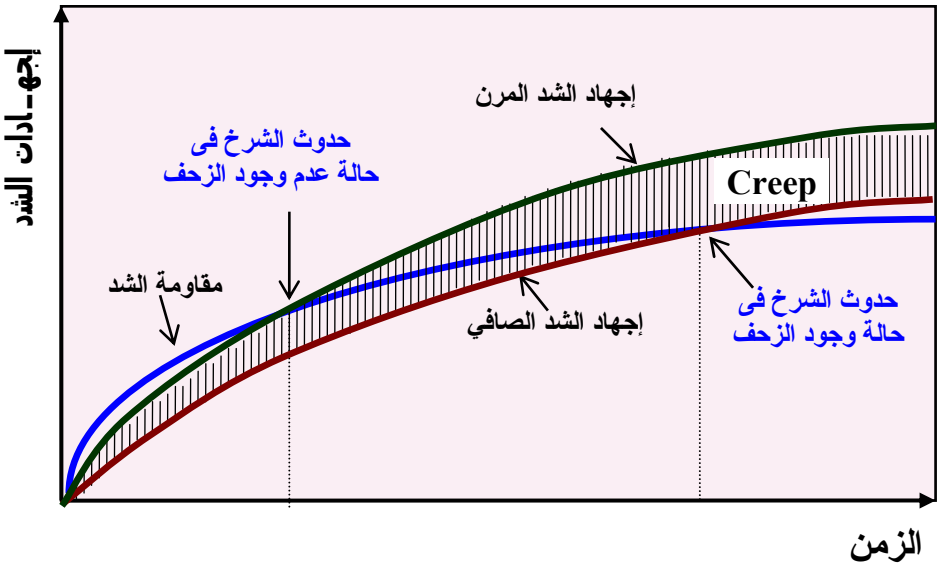
ولكن بصفة عامة فإنه لا توجد حالات إنهيار نتيجة الزحف بمفرده ولكنه عامل مساعد على تصدع الخرسانة فى بعض الحالات.

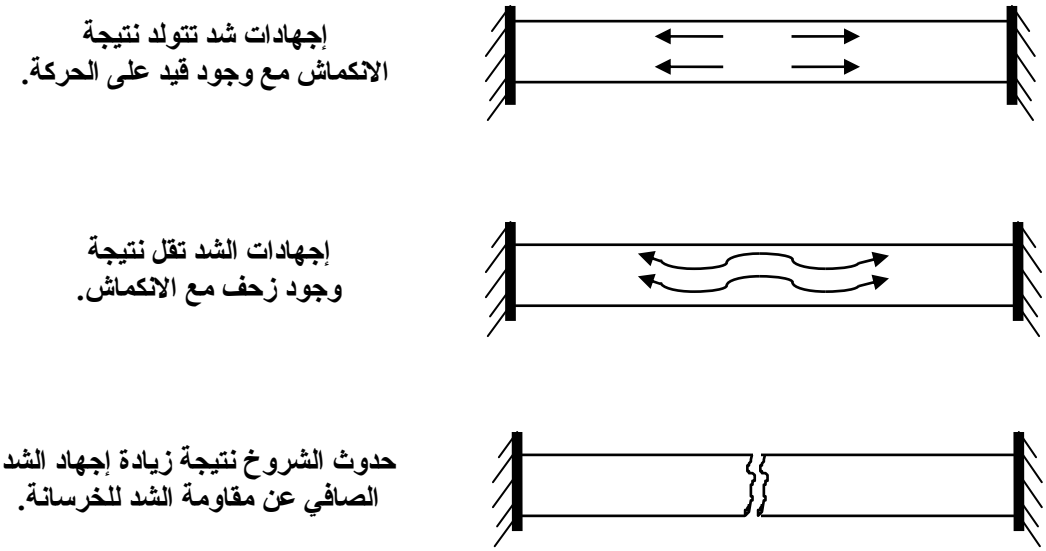
التأثير النافـع:

يؤدى الزحف إلى تقليل الإجهادات التى يسببها إنفعال شد ثابت مع الوقت (مثل الإنكماش) وبالتالى يتولد عندنا إجهاد شد صافى هو الفرق بين الإجهاد الأصلى وتأثير الزحف. وهذه الظاهرة تعرف بالإسترخاء Relaxation. ومما هو معروف أن الشروخ لا تتكون إلا إذا زاد إجهاد الشد الصافى عن مقاومة الخرسانة للشد ، كما هو موضح بشكل (١٠-٧).

تدريب:

- **خذ أستك بطول معين ثم شد الأستك بين دبوسين وأتركه لمدة يوم أو يومين ولاحظ التغيرات التى تحدث له.**
- **أنفخ بالونة وأتركها عدة أيام منفوخة ثم لاحظ التغيرات التى حدثت على سطحها. هل سطحها مازال مشدوداً بنفس القوة مثل وقت أن نفختها ؟! وهل تتوقع أن هناك قيمة من الإنفعالات حدثت لها حتى بعد أن تفرغ منها الهواء ؟! هل هذا هو التشكل المتبقى Residual deformation ؟!**
- **هل هذه المواد صافية المرونة Pure elastic أو أنها مرنة- لدنة Elasto-plastic ؟!**





شكل (١٠-٧) التأثير النافع للزحف.

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).

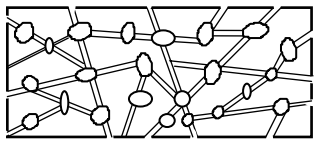
أنــواع المسـام الداخليـة

يوجد ثلاثة أنواع من المسام يمكن تمييزها كما يلى:

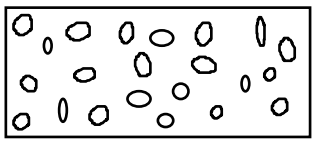
أ - المسام الهوائية ومنها الصغير جداً وهو عادة ما يتم تكوينه صناعياً داخل الخرسانة عن طريق إضافات الهواء المحبوس لزيادة القابلية للتشغيل وتحسين المقاومة للصقيع ومنها المسام الهوائية الكبيرة غير المنتظمة وهى تنشأ عادة عن عيوب الصب والدمك للخلطة الخرسانية والمسام الهوائية يتراوح قطرها من ٠,٠١ إلى ٠,٢ مم.

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).

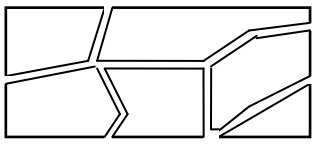
ج - المسام الشعرية Capillary Pores بعد خلط الأسمنت مع الماء مباشرة يحدث تكتل لحبيبات الأسمنت والماء ويسمى الماء الموجود فى الفراغات داخل هذا التكتل بالماء الشعرى Capillary Water حتى يحدث له تفاعل كامل مع الأسمنت ويترك مكانه خالياً مكوناً المسام الشعرية التى تعتبر أكثر أنواع المسام والتى تحدد درجة المسامية 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.

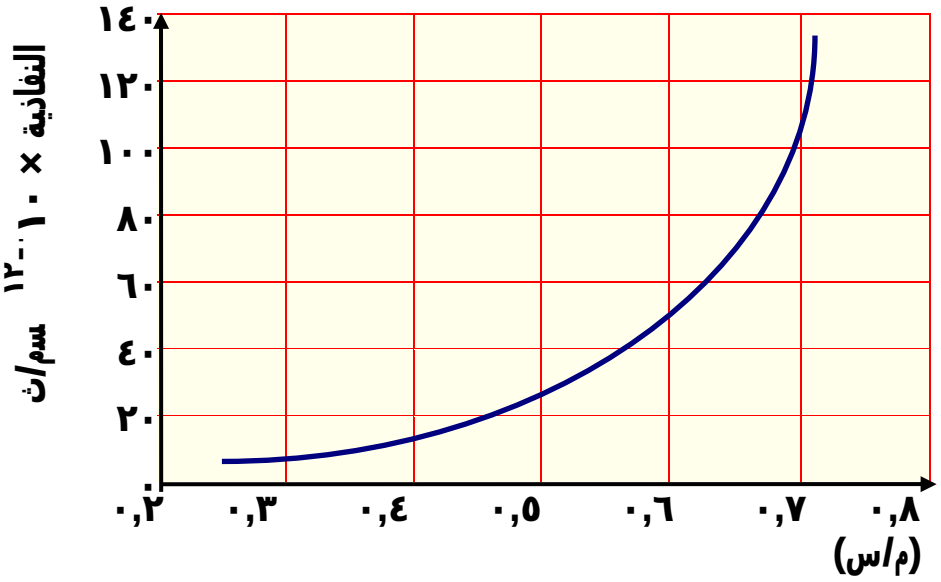
٢- الركام - يجب أن يكون الركام من النوع المصمت السليم غير المسامى كما يجب أن يكون متدرجا ويجب أن يكون من النوع الذى لا يتفاعل قلوياً مع الأسمنت حتى تتلافى وجود الفراغات الناتجة من هذا التفاعل.

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.



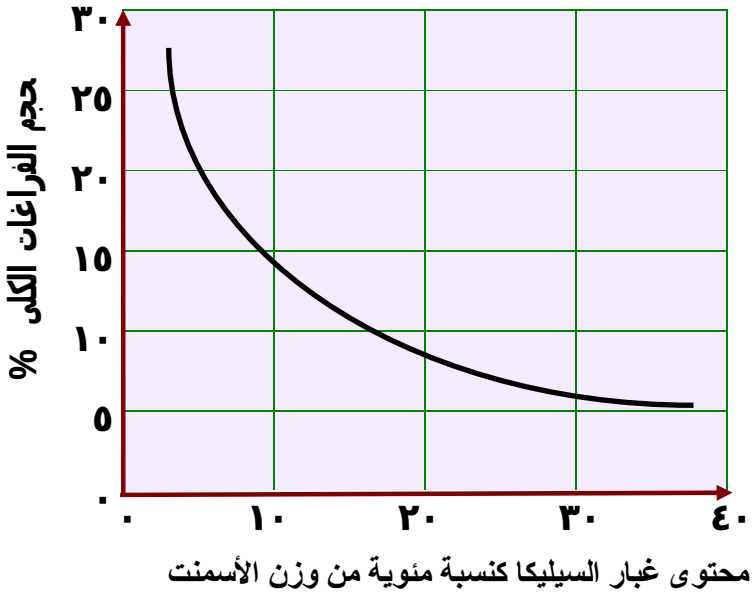
شكل (١١-٢) تأثير نسبة (م/س) على النفاذية.

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.

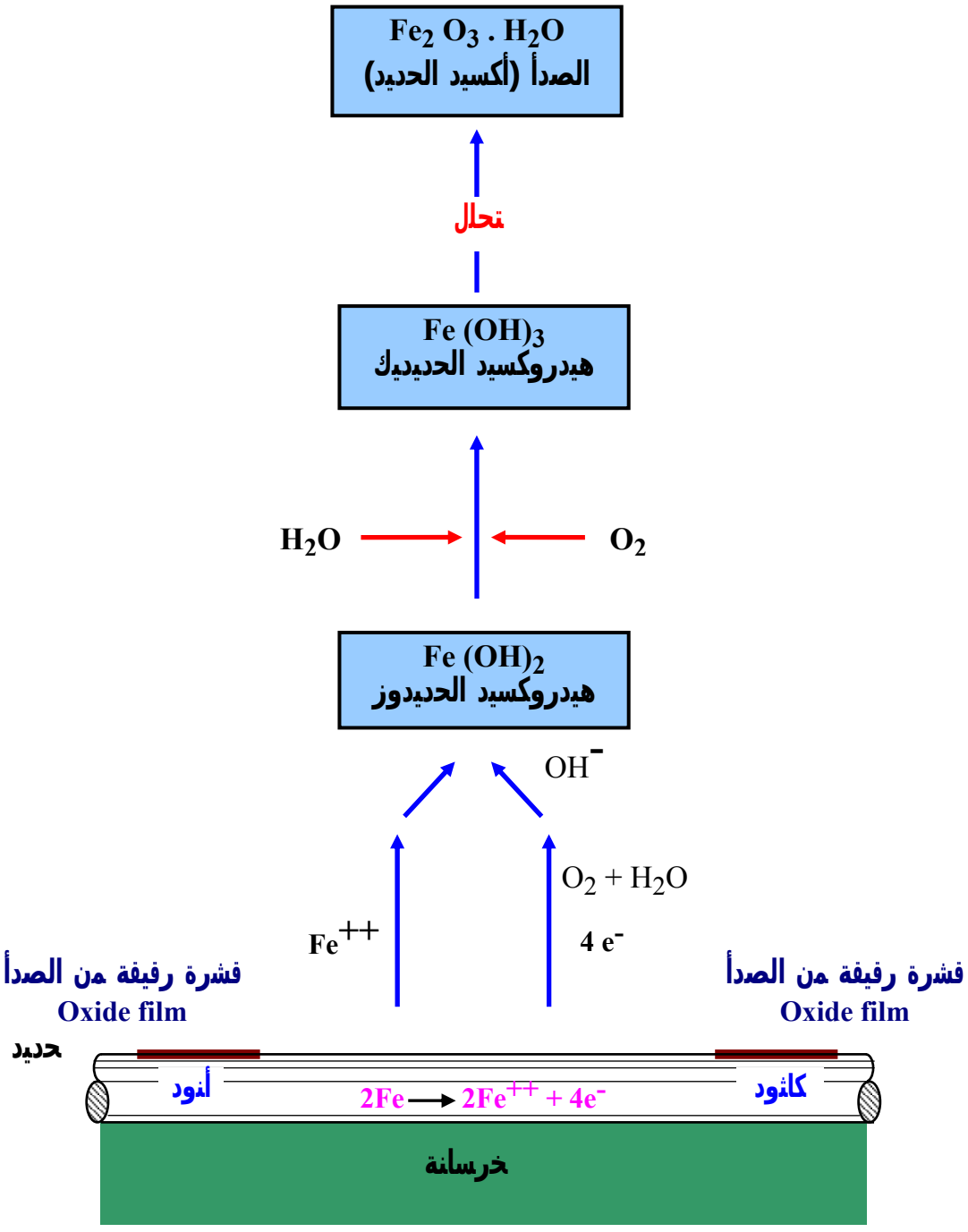
٣- التحول الكربونى يكون بطيئاً جداً فى الخرسانة الجيدة ولكن عدم جودة الخرسانة ونفاذيتها وقلة سمك الغطاء الخرسانى ووجود الشروخ السطحية ووجود رطوبة من ٥٠ - ٧٥% تسرع بمعدله.

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

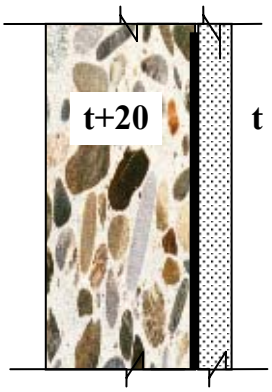
يسبب التمدد الحرارى إجهادات داخلية فى الخرسانة سيما إن كانت مقيدة الحركة وهذه الإجهادات قد تسبب شروخاً وتفتتاً فى الخرسانة إذا لم تؤخذ فى الإعتبار. ويعتمد معامل التمدد الحرارى للخرسانة بدرجة كبيرة على نوع الركام المستخدم وتدرجه. وقيمة معامل التمدد الحرارى للخرسانة = ١×١٠-٥ لكل درجة مئوية (س°). كما أن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

****

****