الخرسانة Concrete

تعريف

"الخرسانة هى بنيـان 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"

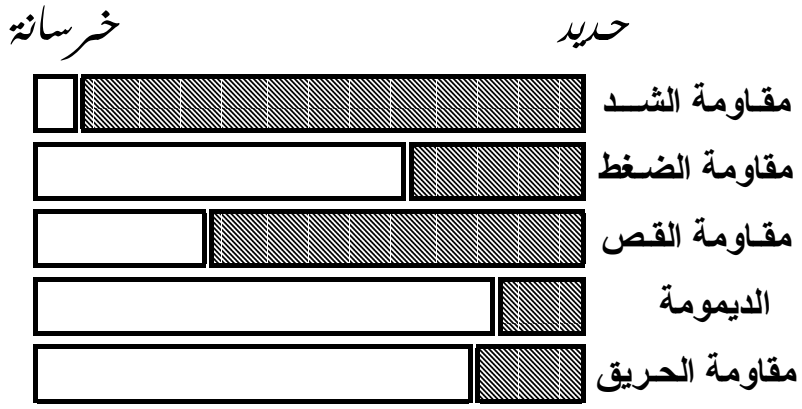
ونسب توزيع المواد المختلفة المكونة للخرسانة (بالحجم) فى أغلب الأحوال هى:

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

ويتضح من ذلك أن الركام هو المكون الأساسى لجسم الخرسانة حيث يحتل حوالى من ٣/٢ الى ٤/٣ حجم الخرسانة. والركام يعتبر مادةرخيصة نسبياً بالإضافة إلى أنه يعمل على تقليل التغير الحجمى للخرسانة الناتج من عمليتى التجمد والتصلد ومن تفير 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.

الخرسانة كمادة انشائية

الخرسانة فى حالتها المتصلدة تبدو آمادة صخريةذات مقاومة عالية للضغط أما فى حالتها الطرية (الطازجة) فلها خاصية اللدونة التى تسمح بتشكلها فى أى قالب معمارى مطلوب. وتعتبر الخرسانة مع حديد التسليح(الصلب) أكثر المواد الإنشائية شيوعاً وإستعمالًا فى عصرنا الحديث وذلك لسهولة تواجدها والرخص النسبى للمواد المكونة لها و لسهولة ورخص تصنيعها. ويمكن إستعمال الخرسانة بالإشتراك مع مواد أخرى لتكوين مقاطع مركبة Composite Sections كما فى حالت إستخدام قطاعات الصلب مع الخرسانة أو لتكوين مواد مركبة Composite Materials كما فى حالة غضافة 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(1).



الخاصية	الخرسانة	حديد التسليح
مقاومة الشد	ضعيف جداً	جيد جداً
قاومة الانضغاط	جيد	جيد ولكن يحدث إنبعاج للمقاطع النحيفة
مقاومة القص	متوسط	جيد
الديمومة	جيد جداً	ضعيفة ويتاكل إذا كان غير محمى
مقاومة الحريق	جيد	ضعيفة ويفقد مقاومته سريعاً فى درجات الحرارة العالية

شكل (1)تكامل الخواص فى الخرسانة وحديد التسليح.

ومن أهمعيوب الخرسانة أن مقاومتها للشد ضعيفة نسبيا ولهذا فعند إستعمالها فى الأغراض الإنشائية فإنه يتم إستعمالها مع حديد التسليح (الصلب) الذي يقوم بمقاومة قوى الشد.

ومن عيوب الخرسانة كذلك الحركة الناتجة من الإنكماش بالجفاف أو من الرطوبة والتى تسبب شقوق شعرية دقيقة يلزم لتجنب حدوثها وضع حديد التسليح المناسب أو عمل مفاصل 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 وتاكله وأيضاً ينتج عنه تضرر سطح الخرسانة وتلفها.

تطور صناعة الخرسانة

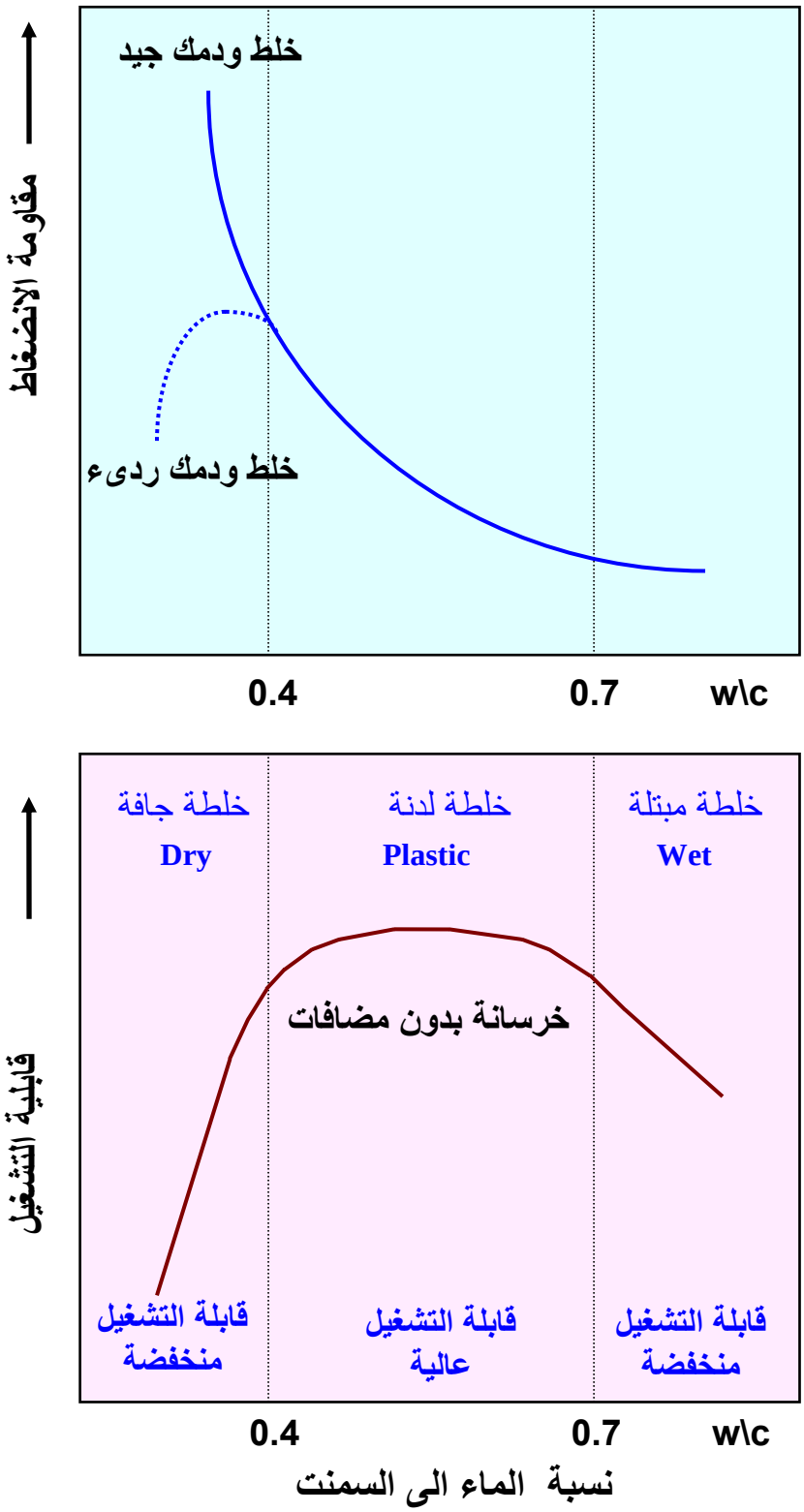
مع بداية القرن العشرين كانت الخرسانة تجاهد لكى تقف بين مواد البناء الأخرى وكانت مقاومة الانضغاط التى تصل إلى ١٤٠ كغم/سم^2 تعتبر قيمة كبيرة ولها إعتبارها. ولم تكن هناك طرق معينة لتصميم خلطة خرسانية ولا أساليب للتصميم المختلفة كذلك لم يكن هناك الأنواع المختلفة من الأسمنت والتى تناسب الأغراض المتنوعة. كما أنه لم يمكن 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 من٠,٢٢ الى ٠,٢٥ من وزن الأسمنت حسب نوع ودرجة نعومة الأسمنت. ولكن المشكلة تبدو أن هذه النسبة القليلة من الماء تعطي خرسانة جافة جداً صعبة التشغيل مما يضطر منتج الخرسانة إلى زيادة الماء بالقدر الذى يعطي خرسانة لدنة ذات قابلية عالية للتشغيل .وقد اتضح من التجارب المعملية و الخبرة العملية أن نسبة الماء التى تعطي خلطة خرسانية لدنة ذات قابلية عالية للتشغيل (بدون إستخدام اضافات) هي 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 (1) فإن هذه النسبة من الماء تعطي خرسانة متوسطة المقاومة Normal Strength Concreteوالحقيقة أن الخرسانة ظلت حتى وقتنا الحالى تنتج بمقاومة متوسطة تتراوح من ٢٠٠ الى٣٠٠ كغم/سم^{2}ومعظم التصميمات الإنشائية فى وقتنا الحاضر تتم بإستخدام خرسانة ذات مقاومة٢٥٠ كغم/سم^{2}أى بإستخدام نسبة (w\c) من٠,٤ إلى٠,٧ .



شكل (2) العلاقة بين w/c وكلٍ من مقاومة الضغط والقابلية للتشغيل.

وفي الوقت الحالي نشهد بدية ثورة ثانية فى تكنولوجيا الخرسانة حيث أمكن التغلب على التناقض الناشئ بين المقاومة العالية والقابلية المنخفضه للتشغيل وذلك بإنتاج وإستخدام بعض المضافات المخفضة للماء Superplasticizers والتى تسمح بإستخدام نسبة ماء قليلة جداً قد تصل إلى ٠,٢٥ من وزن الأسمنت وفى نفس الوقت تعطي قابلية عالية للتشغيل وبالتالى الحصول على خرسانة ذات مقاومة عالية جداً قد تصل الى ١٤٠٠كغم/سم^2 .

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 فى مدينة كوالا لمبور والذى يصل إرتفاعه الى ٤٥٠ متر وذلك بإستخدام خرسانة ذات مقاومة للضغط مقدارها ٨٠٠ كغم/سم^2 واخرها برج الشيخ خليفة في امارت دبي. 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.**

المضافات Admixtures

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

تعريف

الإضافاتهي 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 تجمد الخرسانة.
- تقليل معدل فقد الهبوط او الهطول 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.

الشروط العامة المطلوبة عند استخدام المضافات

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 المضافات مع الأسمنت المخلوط أو عالية المقاومة للكبريتات يختلف عنه فى حالة الأسمنت البورتلاندى. لذلك يجب أن تتوفر معلومات كافية عن مدى اداء المضاف مع الأنواع المختلفة من الأسمنت.

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

اهم انواع المضافات الخرسانية

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

١- إضافات تخفيض الماء والتحكم فى وقت التجمد (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.

١ـ إضافات تخفيض الماء والتحكم فى وقت التجمد

Water Reducing and Set Controlling Admixtures (ASTM C494)

وهذه الإضافات هى أهم وأكثر أنواع الإضافات إستخداما وشيوعا 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 التجمد ASTM C494 - Type B

٣ـ إضافات تعجيل التجمد ASTM C494 - Type C

٤ـ إضافات تخفيض ماء الخلط وتأخير التجمد ASTM C494 - Type D

٥ـ إضافات تخفيض ماء الخلط وتعجيل التجمد 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 التجمد (المؤجلات) ASTM Type B

٣ـ تعجيل التجمد (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.

فى حين 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) عموما فى صورة سائلة وتضاف الى الخلطة الخرسانية بنسبة تتراوح من ١% إلى ٣% من وزن الأسمنت وهى أكثر وأهم أنواع الإضافات إستخداما وشيوعا. وقد وجد أن نسبة ٣% من الملدنات الفائقة تعطى أفضل النتائج. وتوجد الملدنات فى السوق تحت أسماء تجارية عديدة منها أدكريت - كونبلاست - سيكامنت - ملمينت ٠٠٠الخ. 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 الطرية ذلك بزيادة القابلية للتشغيل وزيادة السيولة مع ثبات نسبة (W\C) كما في الشكل (1).
- الحصول على خرسانة ذاتية الدمك.
- تحسين خواص الخرسانة المتصلدة وذلك بتخفيض نسبة W\C فى الخلطة مع ثبات درجة القابلية للتشغيل وبالتالى الحصول على خرسانة عالية المقاومة (شكل 2).
- الحصول على خرسانة ذات مقاومة مبكرة عالية(شكل 3).
- 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

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

- الأساس الكيميائى للنوع F

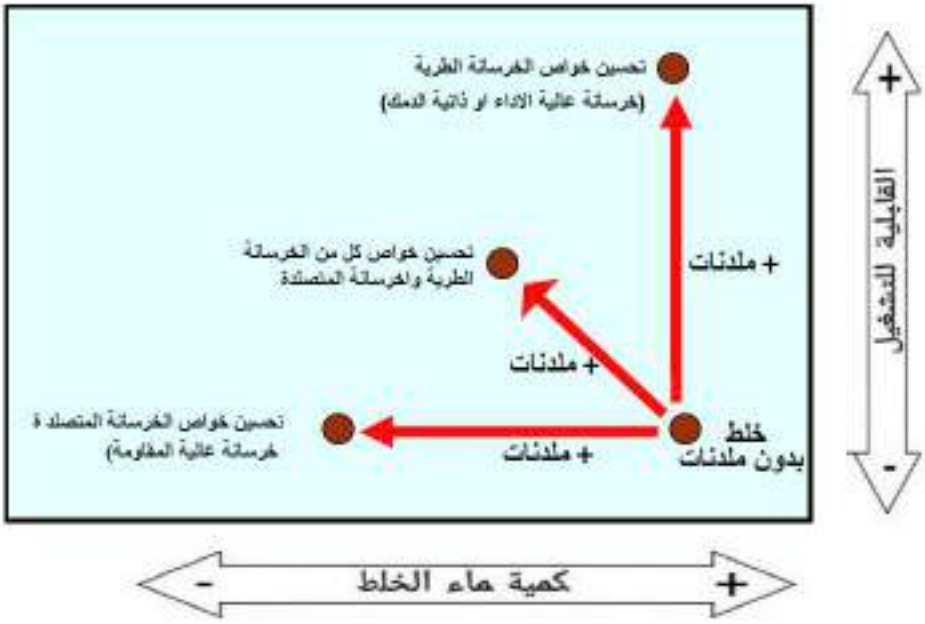
Modified Ligno-Sulfonate	ـ لجنوسلفونيت معدل
Melamine Formaldehyde	ـ ميلامين فورمالدهيد
Naphthaline Formaldehyde	ـ نفثالين فورمالدهيد
Phenol Formaldehyde	ـ فينول فورمالدهيد
Beta-naphthaline Sulfonate	ـ ناتج تكثيف بيتا نفثالين سلفونيت

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.

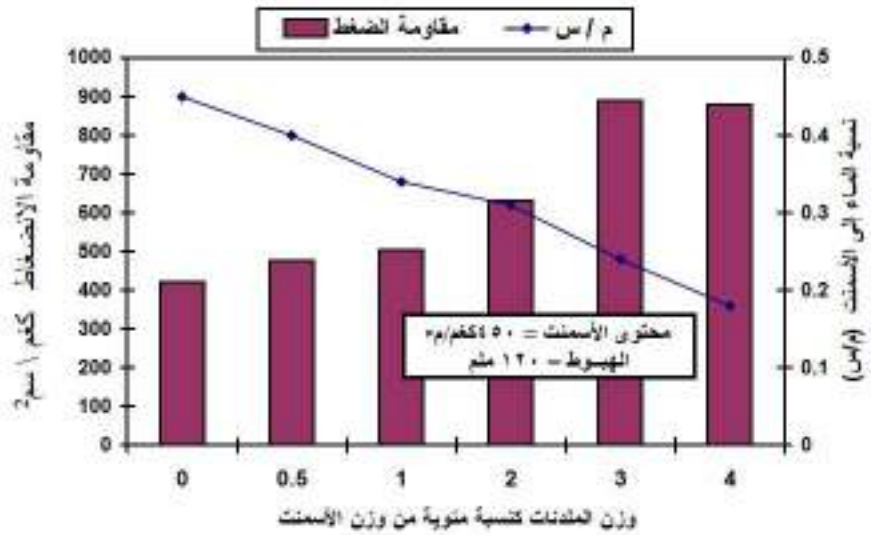
□ أسس إختيار الملدنات والملدنات الفائقة □

ينبغي أن يكون إختيار نوع مادة الملدن على الأسس الآتية:

١ ـ معدل تخفيض ماء الخلط	٢ـ معدل فقد قابلية التشغيل
٣ ـ التأثير على زمن التجمد	٤ ـ التوافق مع الأسمنت المستخدم
٥ ـ المقاومة الناتجة للخرسانة	٦ ـ الثمن و التكاليف.



شكل الوظائف الرئيسية للملدنات أو الملدنات الفائقة.



شكل(2) 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 ـ تشتيت حبيبات الأسمنت المتكتلة وإطلاق المياه المحبوسة بينها.

٢ ـ إحداث التنافر الكهروستاتيكى بين الجزيئات.

٣ـ العمل على تلاسق وترطيب للطبقة الرقيقة بين حبيبات الأسمنت.

٤ـ تأجيل عملية الإماهة السطحية لحبيبات الأسمنت مع ترك المزيد من المياه لتسييل الأسمنت.

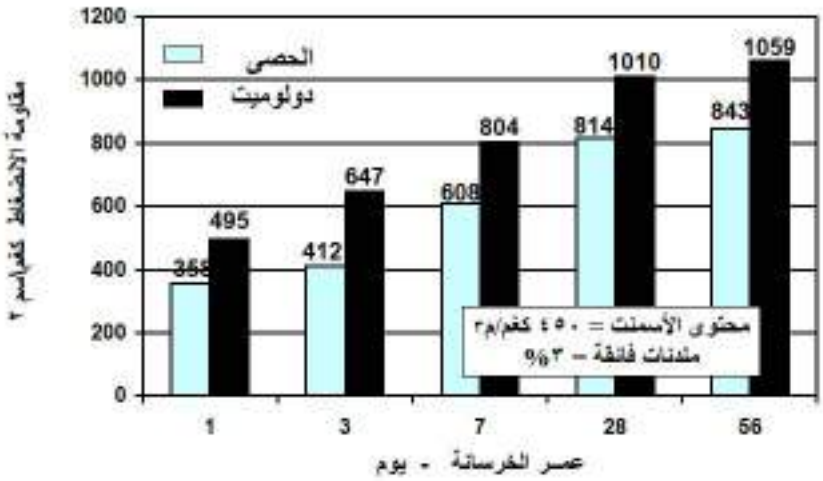
٥ ـ تقليل الشد السطحى للمياه.

٦ـ تغير البنية التركيبية فى منتجات تفاعلات الإماهة.

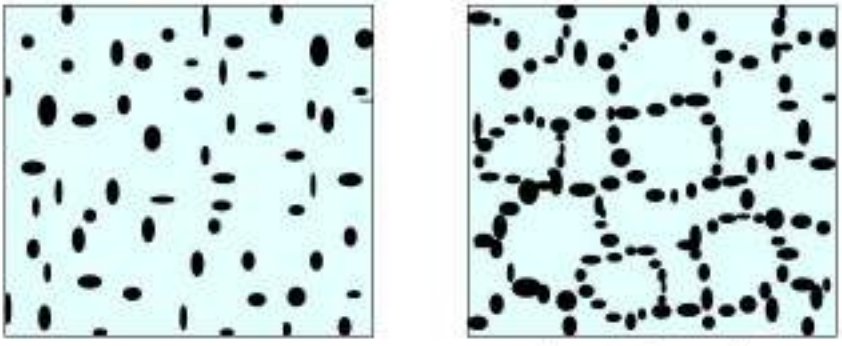
إن جزئيات الأسمنت البورتلاندى العادى تتميز بميلها الشديد للتكتل عندما تخلط مع الماء وهذا الميل هو حصيلة لتفاعلات داخلية متنوعه مثل التفاعلات الالكتروستاتيكية بين الشحنات المتضادة وكذلك تفاعلات عملية الإماهة المتنوعة. إن عملية التكتل تقود إلى تشكيل شبكة من الجزيئات كما هو موضح فى الشكل (4-أ) حيث تقوم 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(4-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 تؤخذ كمية ثابته من الأسمنت وتخلط مع الماء خلطاً جيداً ويترك 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(3)استخدام الملدنات الفائقة للحصول على مقاومة مبكرة عالية.



(أ) بدون ملدنات تكتل

(ب) وجود ملدنات تشتت

شكل(4) دور الملدنات أو الملدنات الفائقة في فصل وتشتيت حبيبات الأسمنت المتكتلة.

ثانياً :اضافات تاخير التجمد (المؤجلات) Retarders

ASTM C494 Type B

▫ وظيفتها ▫

تؤخر تجمد الأسمنت أى تزيد زمن تجمد 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 التجمد الابتدائي 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 تجمد 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 متجمد الأسمنت أى تقلل زمن تجمد و تصلد الخرسانة وبالتالى يزداد معدل التصلد وكذلك تزداد الحرارة المنبعثة المبكرة.

□ الهدف منها □

أ- تستعمل لغرض تعجيل تجمد الخرسانة كما في الحالات الاتية

- إزالة تأثير تأخير التجمد الناتج من درجات الحرارة المنخفضة.
- إزالة تأثير تأخر التجمد الناتج من إستخدام اضافة أخر ى.
- أعمال الطوارى مثل وقف رشح المياه فى الخزانات.

ب-استخدام لغرض الحصول على خرسانة مبكرة المقاومة كما في حالة

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

جـ- تستخدم لغرض الحصول على خرسانة تقاوم الصقيع نتيجة الحرارة المنبعثة المبك.

□ أهم المركبات المستخدمة □

المركبات المستخدمة كمعجلات للتجمد فى الخرسانة هي 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 التجمد وأملاح الكربونات الذائبة وتستخدم بنسب ١ إلى ٢% وبحد أقصى ٤% من وزن الأسمنت. ولكن من عيوب إستخدام كلوريد الكالسيوم فى الخرسانة المسلحة هو إمكانية حدوث تآكل وصدأ فى حديد التسليح نتيجة تواجد أيونات الكلور فى وجود الرطوبة والأوكسجين. لذلك يجب عدم إستخدام كلوريد الكالسيوم فى الخرسانة المحتوية على حديد تسليح. وتوجد مركبات أخرى بديلة ولكنها أقل كفاءة وأغلى ثمناً مثل نيتريت الكالسيوم وأملاح النترات والبروميدات والفلوريدات والكربونات والسليكات.

□ إحتياطات□

- عدم زيادة نسبةهذه الإضافات عن الحد الأقصى وذلك مخافة حدوث التجمد الخاطف Flash Set.
- استخدامها فى الأجواء الحارة بحساب وحذر لتلافى حدوث شقوق الانكماش.

2-Air Entraining Admixtures اضافات الهواء المقصود او المحبوس

◻ الهدف منها ◻

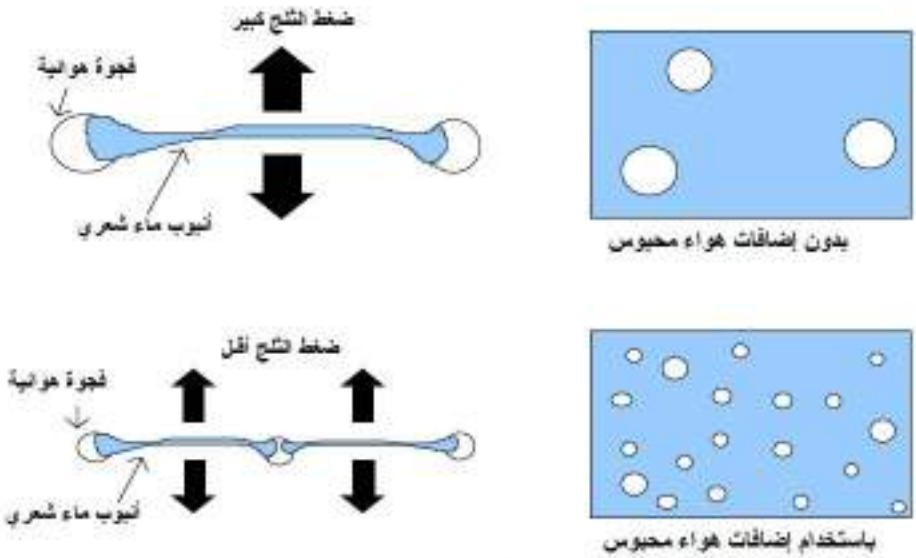
تقليل وزن الخرسانة وزيادة المتانة Durability وخاصة المقاومة للصقيع Frost Resistance ويتم ذلك عن طريق إحداث فقاعات Bubbles هوائية دقيقة (غير متصلة) موزعة توزيعا منتظما خلال الكتلة الخرسانية وتبقى كذلك بعد تصلد الخرسانة كما فى الشكل(5).

◻ 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(5)تأثير إضافات الهواء المحبوس فى تحسين مقاومة الصقيع .

3-Permeability-Reducing Admixtures مضافات لمنع نفاذ الماء بالخرسانة

□ 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.

□ يمكن تحسين نفوذية الخرسانة من خلال المحاور الثلاثة الآتية□

اولا: اضافات مانعة للماء **Water Proofing Agents**

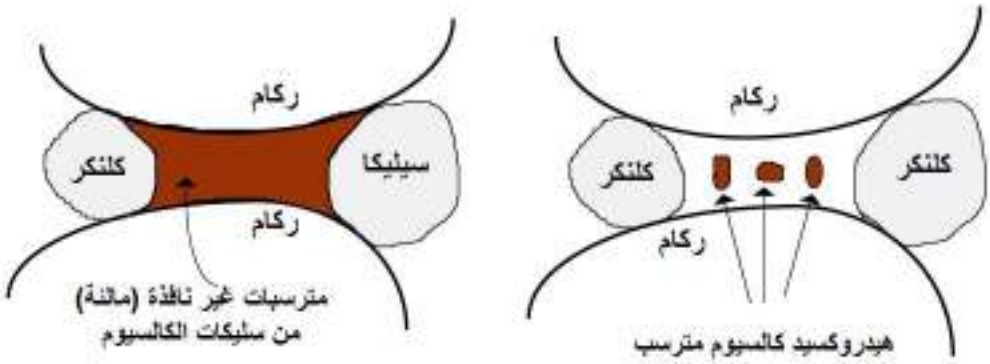
وهى تعمل على منع الخرسانة من امتصاص ماء المطر والمياه السطحية الملامسة ومن امثلتها زيوت البترول والشمع Wax وتضاف بنسبة تتراوح من ٠,١% إلى ٠,٤% من وزن الأسمنت. وتستخدم المواد البوليمرية أيضا لهذا الغرض وذلك فى صورة دهانات لأسطح الخرسانة لسد الفجوات الهوائية والشروخ الشعرية الموجودة بالسطح.

ثانيا: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.

ثالثا: استعمال مواد بوزولانيه 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** وهي مادة تتكون من حبيبات دقيقة جداً مساحتها السطحية حوالى أربعة إلى خمسة أمثال المساحة السطحية للأسمنت (٢٠٠٠٠ سم^2/كغم) وهي ناتج ثانوى **Byproduct** فى صناعة سبائك السيليكون والفيروسيليكون. وتتفاعل مادة غبار السيليكا مع هيدروكسيد الكالسيوم مكونة سيليكات الكالسيوم المتميئة والتى لاتذوب فتؤدى إلى تقليل الفجوات الداخلية والمسام الشعرية كما هو موضح فى شكل(6).



عملية الإماهة للخرسانة المحتوية على أسمنت بورتلاندى عملية الإماهة للخرسانة المحتوية على غبار السيليكا

شكل (6) دور غبار السليكا في تحسين نفوذية الخرسانة.

4- Antiwashout Admixtures مضافات لمنع اجتراف الاسمنت بفعل الماء

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 حاليا. 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 أيضا 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 تعكر الماء حيث ينبغي أن لا تزيد عن ٥٠ ملغم/لتر كما يقاس الأس الهيدروجينى pH للماء والذى يجب أن يقل عن ١٢,٥ .كذلك تقاس مقاومة انضغاط للخرسانة بعد إخراجها من الماء ، حيث يلزم أن تكون النسبة بين مقاومة انضغاط للخرسانة المصبوبة تحت الماء و مقاومة انظغاط 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 للتزيف بدرجة كبيرة.

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

٤- النوع السليولوزى من هذه الإضافات يعمل على تأخير الانجماد الإبتدائى والنهائى ، حيث قد يصل الانجماد الإبتدائى إلى أكثر من ١٨ ساعة بينما يزيد الانجماد 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.

5- Coloring Admixtures مضافات لتلوين الخرسانة

وهى عبارة عن أكاسيد معدنية **Metallic Oxide** وهى متوفرة فى صورة مواد طبيعية أو صناعية ويشترط فيها أن تكون خاملة كيميائيا 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 الحديدالأصفر ⇦ لون ابيض مصفر

أكسيدالحديد البنى ⇦ اللون البنى

6- Miscellaneous Admixtures مضافات اخرى متنوعة

يوجد العديد من المضافات 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 المائية.

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.

****

الانواع المختلفة (الخاصة) من الخرسانة
Special Types of Concrete

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

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

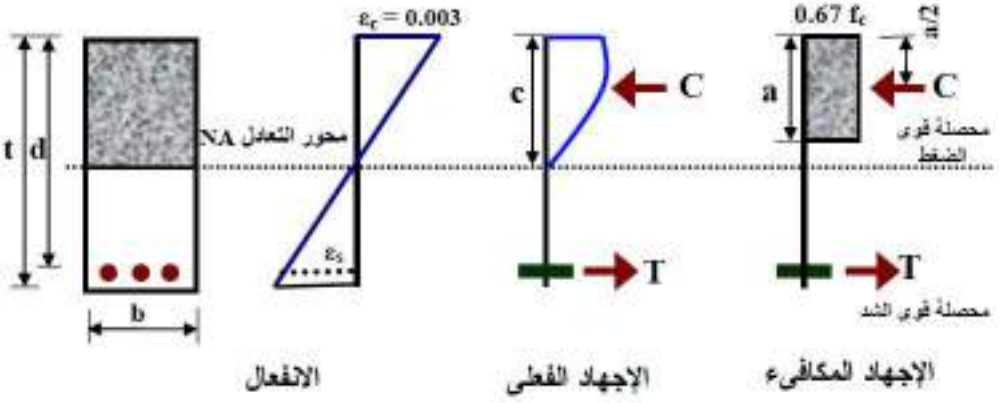
فيما يلي نبذة مختصرة عن أهم هذه الأنواع:

1- Plain Concrete الخرسانة العادية

وهي 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 كغم/سم^2 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.

2- Reinforced Concrete الخرسانة المسلحة

وهي 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 (١) يوضح توزيع الإجهادات والانفعالات على قطاع مستطيل من الخرسانة المسلحة.



شكل (١) مخطط الاجهاد والانفعال لمقطع جسر مستطيل من الخرسانة المسلحةمعرض لعزم انحناء .

3- Prestressd Concrete مسبقة الاجهاد

وهي خرسانة عادية يتم إكسابها إجهادات ضغط قبل تحميلها وهذه الإجهادات تكون كفيلة بتحمل إجهادات الشد الناتجة من تأثير الأحمال وبالتالى لا تحتاج إلى حديد تسليح حيث تكون المحصلة النهائية للإجهادات على طول القطاع الخرسانى بعد التحميل (التشغيل) غالباً إجهادات ضغط وبالتالى تكون الخرسانة كفيلة بتحملها .وبناءاً عليه يجب أن تكون الخرسانة ذات مقاومة عالية للضغط تتراوح من ٣٥٠ إلى ٦٠٠كغم/سم^2 وذلك حتى يمكنها تحمل إجهادات ضغط التصنيع وإجهادات ضغط التشغيل. وأسياخ الصلب المستخدمة فى الخرسانة سابقة الإجهاد تسمى كبلات Tendons وهي عبارة عن أسلاك Wires أو حبال مجدولة من مجموعة أسلاك Strands أو قضبان من الصلب Bars. وتمتاز الخرسانة مسبقة الإجهاد بقلة الشقوق السطحية مع مقاومة عالية للأحمال. وهي مناسبة للاستخدام فى الجسور والمستودعات المائية والوحدات الجاهزة مثل محطات السكك الحديدية وغيرها. وعموماً يوجد طريقتان لإكساب الخرسانة لإجهادات الضغط:

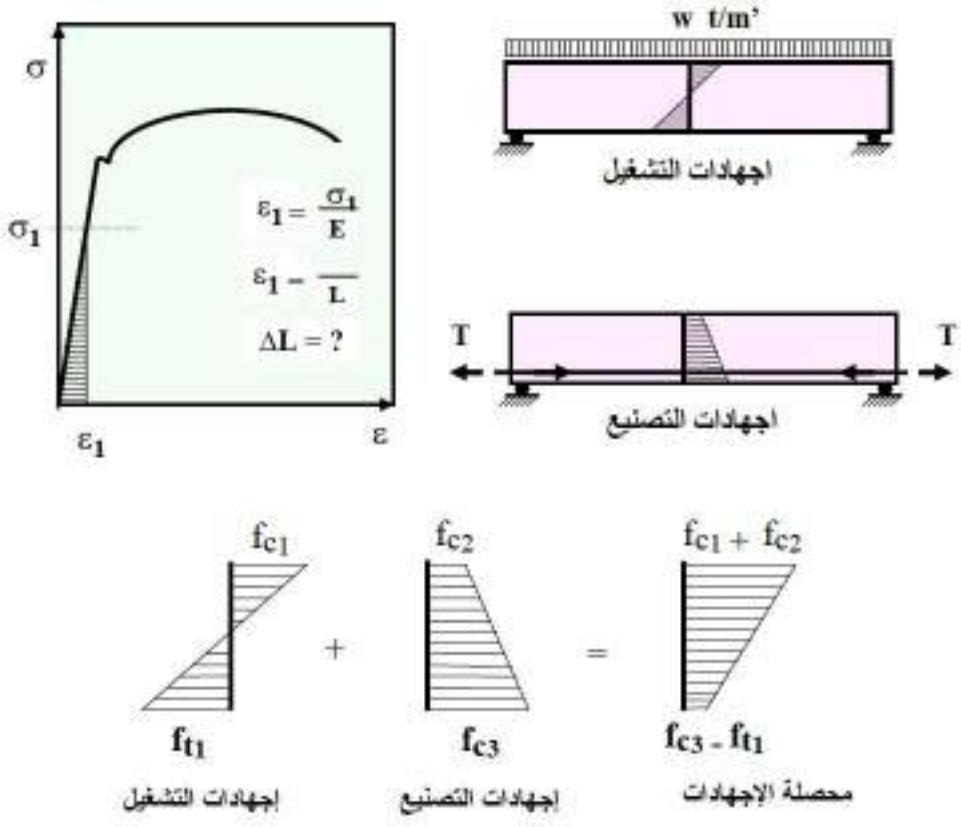
أ- طريقة الشد السابق Pre-tension

وفيها يتم شد كبلات 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 في الشكل (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.

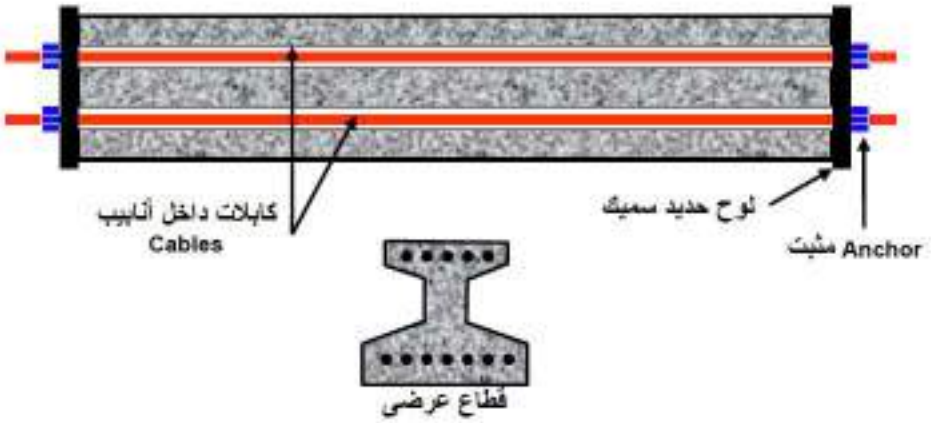
ب- طريقة الشد اللاحق Post-tension

وفيها يتم عمل انابيب مفرغة داخل الخرسانة وتوضع كابلات الصلب حرة الحركه بداخلها بدون شد حتى تتصلد الخرسانة تماماً شكل (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 والانابيب بمونة خاصة التى تتصلد وتقلل من فرصه صدأ صلب الكابلات.

هذا وتحدد الكودات المعتمدة لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة سابقة الاجهاد كافة الاعتبارات الخاصة بالمواد المستخدمة فى هذه الخرسانة وتصميم قطاعاتها ونظم التحليل الإنشائى لها و التفتيش وضبط الجودة الخاص بهذة الخرسانة.



شكل (٢) توضيح لطريقة الشد السابق.



شكل (٣) توضيح لطريقة الشد اللاحق.

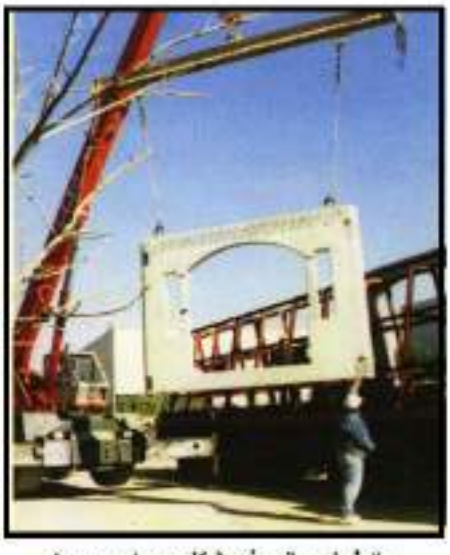
4- Precast Concrete الخرسانة الجاهزة (مسبقة الصب)

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

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

وتوضح الأشكال(٤)،(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 بثلاث ادوار بارتفاع 9,8 متر



حائط خرساني ذو شكل معماري مميز

شكل (٤) بعض الحوائط من الخرسانة سابقة الصب.

سور من الخرسانة مسبقة الصب

مجارى خرسانية لتصريف مياه الأمطار

حلقات خرسانية ذات تجويف بقطر ٨,٣٥ متر

سلالم خرسانية مسبقة الصب

شكل (٥) بعض التطبيقات المختلفة للخرسانة سابقة الصب .

5-High Strength Concrete الخرسانة عالية المقاومة

وهي خرسانة ذات مقاومة تزيد عن ٦٠٠كغم/سم^2 وقد تصل أو تزيد عن ١٤٠٠ كغم/سم^2 ويمكن الحصول عليها باستخدام المواد المحلية المتاحة والتى تستخدم فى صناعة الخرسانة التقليدية (٢٥٠كغم/سم^2) من ركام وأسمنت وماء إلا أن الخرسانة عالية المقاومة تحتوى على مادة إضافية أخرى وهي الملدنات Superplasticizers وذلك حتى يمكننا تقليل ماء الخلط إلى أقصى درجة مع الحصول على نفس القابلية للتشغيل وبالتالى الحصول على المقاومة العالية اما المواد البوزولانية مثل مادة غبار السيليكا Silica fume فمن الممكن تواجدها فى كلا النوعين من الخرسانة. إن أهم شيء 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

٥-١ الخصائص المطلوب توافرها فى المكونات:

أ- الركام الكبير يجب أن يكون قوى ومتين لأنه يعمل كعامل يحدد مقاومة الخرسانة القصوى حيث أن الشقوق 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 الحصى.

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 ٥٠٠ كغم/م^3 .ويعتمد ذلك على خصائص وكميات ونسب باقي المكونات وعما اذا كانت الخلطة تحتوى على مادة غبار السيليكا أم لا.

د- غبار السيليكا Silica fume وهي 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.

٥-٢ تطبيقات الخرسانة عالية المقاومة

ظل استخدام الخرسانة عالية المقاومة فترة طويلة محصوراً فى عدة تطبيقـــــات تقليـديـة 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:

* المبانى عالية الارتفاع High Rise Buildings
* الجسور Bridges
* المنشآت البحرية Offshore Structures

وحديثاً تم استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى تطبيقات أخرى متنوعة شكل (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 الأقواس Arch Girder
* استخدامها مع قطاعات الحديد لزيادة جساءة المنشأ Improving Stiffness
* عمل ركائز لولبية لتنفيذها بدون إهتزازات أو ضوضاء Screwing Piles
* محطات الطاقة النووية Nuclear Power Plants
* الأنابيب الخرسانية تحت الأرض Underground Concrete Pipes
* الأرصفة والطرق Pavements

ملحوظة :

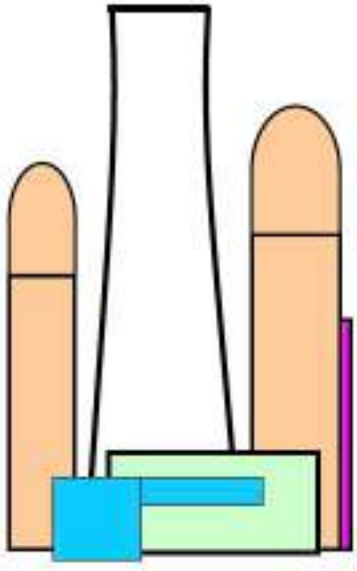
ينبغي أن نفرق بين الخرسانة عالية المقاومة High Strength Concrete والخرسانة عالية الأداء High Performance Concrete فالخرسانة عالية الأداء هى الخرسانة التى لها صفات وخصائص معينة تسمح لها بالعمل فى وسط محدد وفى ظروف معينة. والخصائص التى تميز الخرسانة عالية الأداء عن الخرسانات الأخرى قد تتضمن بعض خصائص الخرسانة 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.

الاقواس Arch Girder

الأنابيب المعدنية المملوءة بالخرسانة

أنابيب المياه تحت الأرض

المنشآت المركبة



محطات الطاقة النووية

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

3-5 المميزات العامة للخرسانة عالية المقاومة:

١ـ مقاومة الضغط فيها من ٦٠٠ إلى ١٤٠٠ كغم/سم٢ (٧ـ٥) مرات مقاومة الخرسانة التقليدية.

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

٣ـ تمتاز بمتانة عالية Durability ومقاومة للاحتكاك ومقاومة للكيماويات.

٤ـ الفوائد الناتجة منها مثل تقليل القطاعات وزيادة الفضاءات وتقليل الوزن أكثرمن الزيادة فى تكاليف إنتاجها.

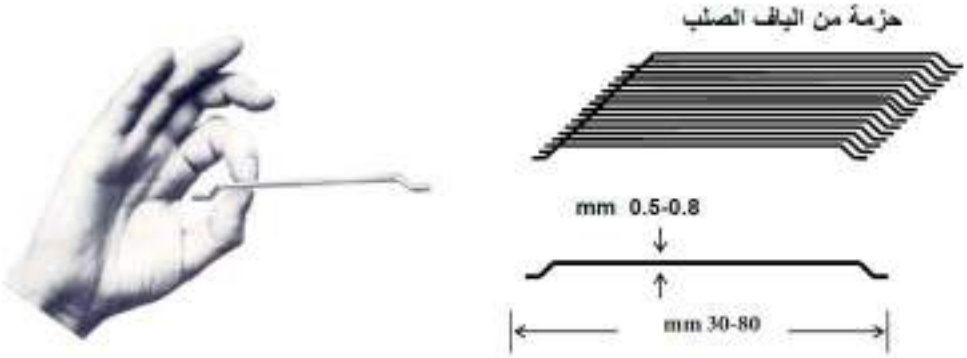
٥ـ تعطى مقاومة عالية بالنسبة لوحدة الثمن ـ وبالنسبة لوحدة الحجوم ـ وبالنسبة لوحدة الوزن Strength / unit weight - Strength / unit volume – Strength / unit Cost

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

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

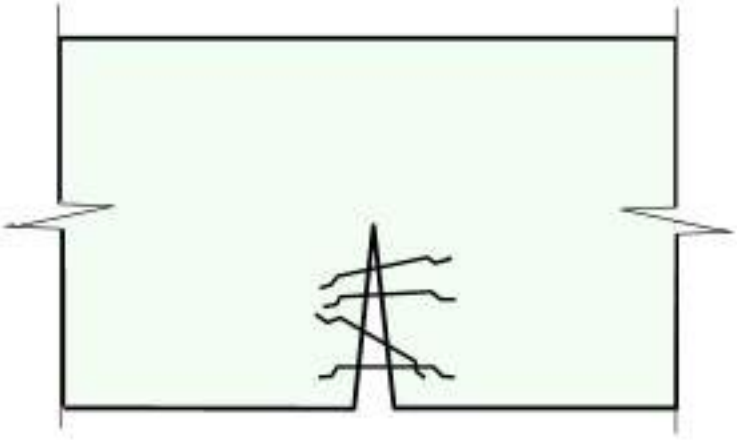
- ألياف الصلب وهى قطع من الصلب بطول ٣ إلى ٨سم وقطر من ٠,٥ إلى ٠,٨ مم كما في الشكل (7).
- والألياف الصناعية مثل ألياف البولى بروبلين والبوليستر والبوليثيلين والأكريلك وتأخذ نفس شكل ألياف الصلب ولكنها مصنعة من مواد صناعية.



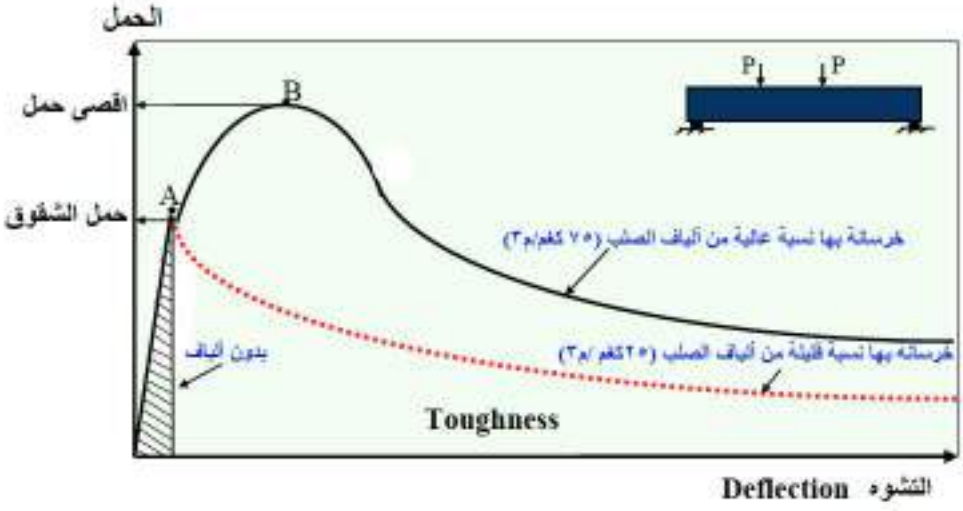
شكل (7) ألياف صلب غير مستقيمة الأطراف.

والألياف لها القدرة على تحسين مقاومة الخرسانة فى القص والشد والانحناء والصدم والانكماش.كما أنها تعمل على تقليل اتساع الشقوق وإعادة توزيعها كما يتضح ذلك من الرسم في الشكل(8) ولكن الألياف لا تؤثر بدرجة كبيرة على مقاومة الضغط. وأهم وظيفة للألياف أنها تزيد من قيمة معاير المتانة للمادة زيادة كبيرة جداً. شكل (9) 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 . الشكل (10) يوضح مقارنة بين عتبتين متشابهتين من الخرسانة المسلحة (بدون اترية) 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 المكائن. كما تستخدم فى الأسقف القشرية ومناطق

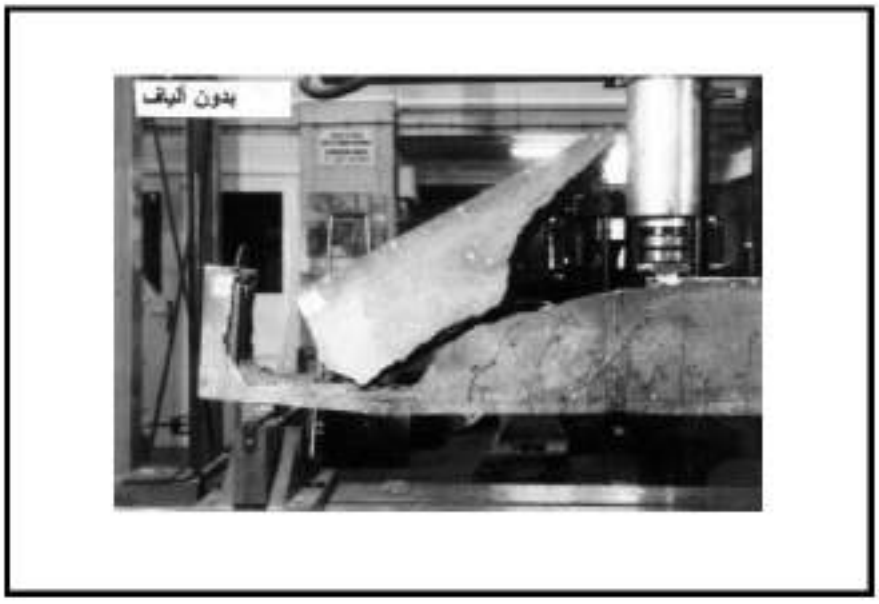
الاتصال بين العتبة والعمود فى الإطارات. وتستخدم الألياف أيضاً فى الانابيب الخرسانية والوحدات سابقه الصب و فى العناصر الخرسانية المعرضة لقوى القص والصدم. وبالرغم من أن الألياف تزيد من مقاومة قوى الشد فى الانحناء إلا أن هذه الزيادة غير جديرة بالاعتبار وبالتالى فإنه ليس من الحكمة أن تستخدم الألياف كبديل كلي أو عوض لاشياش التسليح.

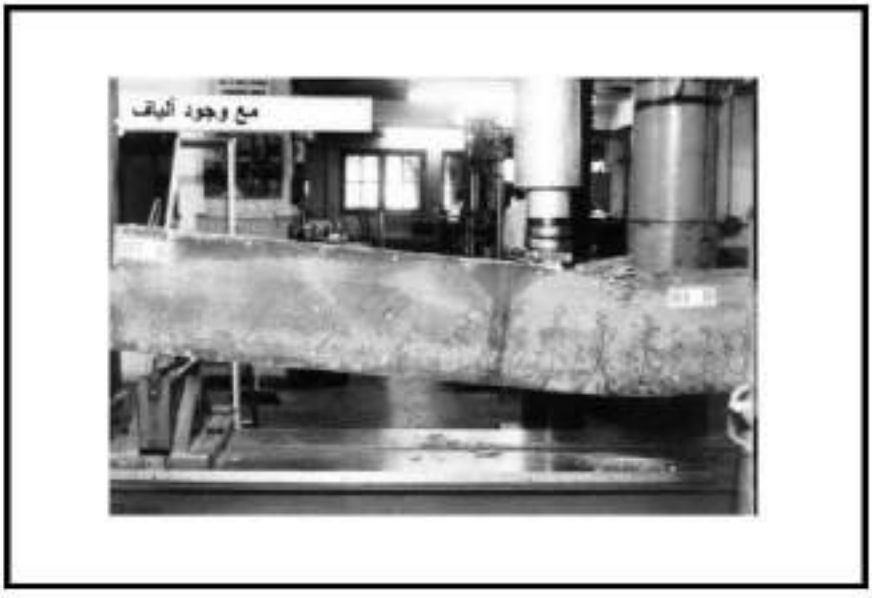


شكل(8)دور الالياف في تحديد اتساع الشقوق واعادة توزيعها.



شكل(9)منحنى الحمل والتشكل للخرسانة الليفية.





شكل (10) تأثير الألياف الفعال فى مقاومة قوى القص وزيادة المتانة.

٧-١ تعريف :

الخرسانة ذاتية الدمك هي 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 لإستعانة 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 لإنتاجهذه الخرسانة. ويعتبر اليابانيون هم رواد صناعة هذه الخرسانة حيث قاموا فى السنوات العشر الأخيرة باستخدامها فى منشآت وتطبيقات عديدة ومفيدة.بعد ذلك تم إنتاجهذه الخرسانة فى العديد من الدول مثل تركيا وأمريكا.

٧-٢ الخواص المطلوب تحقيقها فى الخرسانة ذاتية الدمك:

أولا: 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 ـــ 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 ـــ 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 الحبيبى أثناء صب وتدفق الخرسانة عن طريق ـــ استخدام إضافات تحسين اللزوجة و/أو تقليل نسبة ماء الخلط.

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

٧-٣ مميزات الخرسانة ذاتية الدمك:

١- سهولة الصب فى العتبات المزدحمة بحديد التسليح والعتبات 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 معمارياً من الخرسانة التقليدية.

٧-٤ الاختبارات المطلوبة والغرض منها:

وتجدر الإشارة أنة بالنسبة للخرسانة ذاتية الدمك فإن تحقيق متطلبات وخواص الخرسانة الطرية يكون له الأولية إذا قورن بمتطلبات وخواص الخرسانة المتصلدة حيث تعتبر المرحلة الطرية هنا هي الغاية المنشودة ومن ثُم توجد اختبارات خاصه لقياس خواص المرحلة الطرية 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 . ويلزم أن يكون قطر الإنسياب فى حدود من ٦٠ إلى ٧٠سم.

٢- إختبار إنسياب الخرسانة فى القمع V-Funnel Test

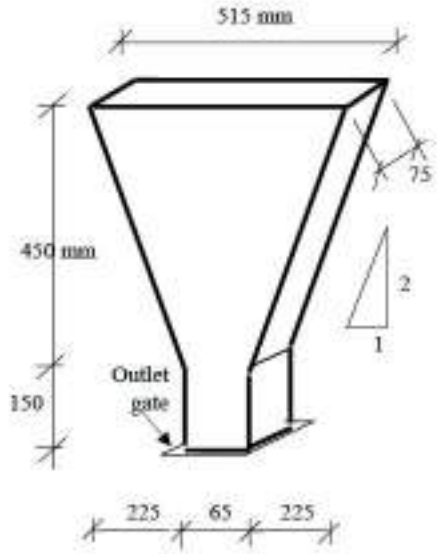
ويقيس قدرة الخرسانة على تغيير مسارها والإنتشار خلال منطقة ضيقة بدون حدوث إنسداد أو توقف. ويستخدم لذلك الجهاز الموضح بشكل (11) حيث يتم قياس زمن مرور الخرسانة بالكامل فى القمع ، وهذا الزمن يجب أن لا يتجاوز عشر ثوان.

٣- إختبار القدرة على الصب والملء Filling Capacity

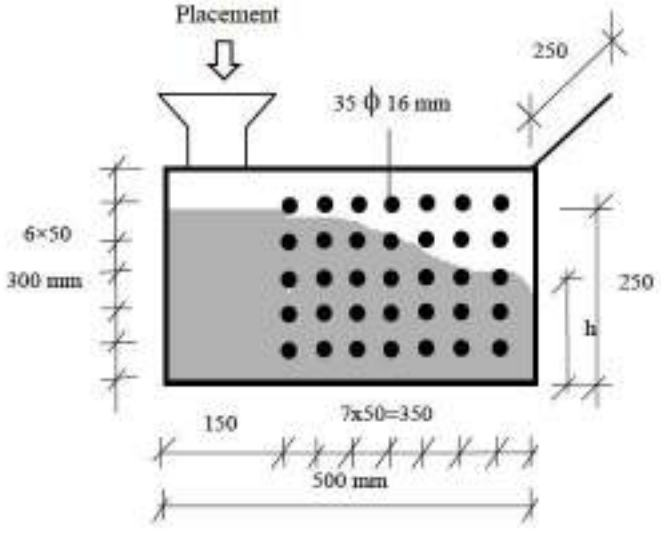
وذلك لقياس قدرة الخرسانة على الصب والتدفق فى وجود منطقة مزدحمة بحديد التسليح دون حدوث توقف أو إنسداد للخرسانة. ويستخدم فى ذلك جهاز خاص كما هو مبين في الشكل (12) حيث يتم قياس النسبة المئوية للخرسانة التى تملء الصندوق والتى ينبغى أن لاتقل عن ٨٠%.

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 (11) الجهاز المستخدم فى إختبار إنسياب الخرسانة فى القمع V-Funnel Test



شكل (12) الجهاز المستخدم فى إختبار القدرة على الصب والملء Filling Capacity Test

8- Shotcrete الخرسانة المقذوفة (خرسانة الرش)

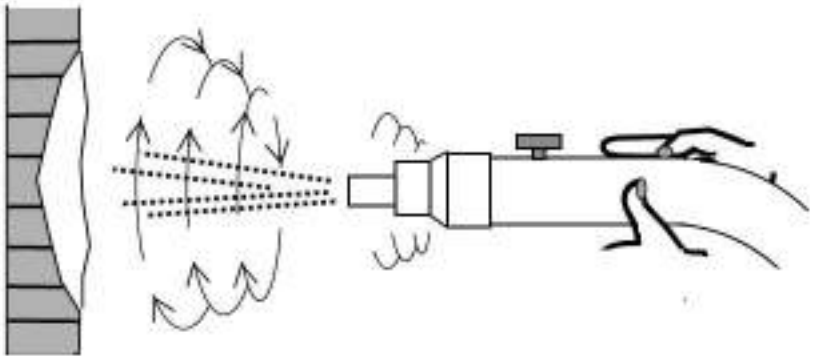
هي خرسانة (أو مونة) تقذف بضغط الهواء من فوهة القاذف بسرعة عالية إلى السطح المراد تغطيته بالخرسانة. وتستخدم غالبا فى أعمال الإصلاحات والترميم Repair وتبطين الأنفاق Tunnels وتبطين الترع وفى كثير من الأحوال التى يصعب فيها إستخدام الطرق التقليدية فى الصب فمثلاً عندما يكون مطلوب صب طبقات غير سميكة أو متغيرة السمك أو عندما يصعب الوصول إلى منطقة العمل أو عندما يكون إستخدام السكلات(السقالات) صعباً أو مكلفاً. كما تستخدم الخرسانة المقذوفة فى إصلاح الخرسانة المتضرره فى الجسور والسدود والمنشآت المواجهة للمياه وكذلك مبانى الطابوق 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 باستخدام ضغط الهواء خلال القاذف ثم يضاف الماء عند فوهة القاذف ويدفع الجميع إلى السطح المراد صبة. أما فى الطريقة الرطبة فيتم خلط جميع المكونات بما فيها الماء خلطاً جيداً أولاً (ماعدا معجلات التجمد إن وجدت) ويدفع الجميع باستخدام 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 باحتوائها على محتوى أسمنت أعلى لتعويض نسبة الفقد منه عند الإرتداد من السطح. كذلك فإن ركامها يتميز بصغر المقاس و يفضل أن لايزيد عن ١٢ ملم. 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 التجمد 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 (13) و الشكل (14) 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 الحالي.

شكل (13) صورة توضح إستخدام الخرسانة المقذوفة فى أحد الأنفاق.



حركة دورانية خفيفة فى فوهة الدفع لإنتاج خرسانة مقذوفة جيدة

شكل (14) يوضح طريقة قذف الخرسانة والتحكم فى فوهة الدفع.

9- Polymer-Concrete الخرسانة البوليمرية

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 ـ ٣ مرات تكاليف الخرسانة العادية وتمتاز بالآتى:

- مقاومة عالية للعوامل الخارجية مثل مقاومة التآكل ونفاذ الماء والمقاومة للكبريتات.
- مقاومة عالية جداً للإنكماش.
- مقاومة انضغاط عالية قد تصل إلى ١٢٠٠ كغم/سم٢
- مقاومة شد تصل إلى ١٠٠كغم/سم٢

وعموماً يوجد ثلاثة أنواع رئيسية من الخرسانة المحتوية على راتنجات:

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

9-1 PC الخرسانة البلاستيكية

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 15).

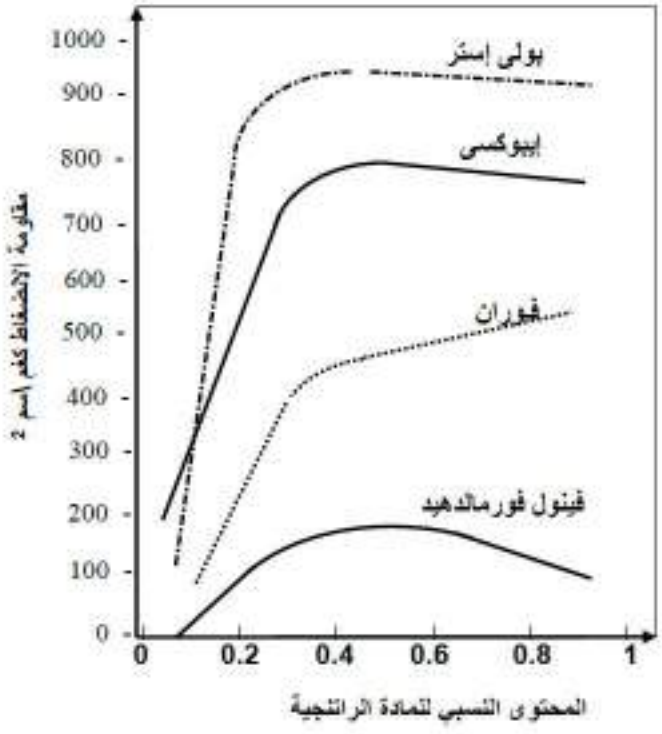
أهم تطبيقات الخرسانة البلاستيكية

١ـ طبقة حماية سطحية لأسطح الجسور والمصانع وأماكن الخدمات والسلالم والخرسانة المسلحة و سابقة الإجهاد.

٢ ـ ترميم الخرسانات التى حدثت بها شقوق نتيجة الحرارة أو الإنكماش أو الأهتزازات.

٣ـ لصق الخرسانة الحديثة والقديمة أو الوحدات سابقة الصب .

٤ـ لصق الخرسانة على المعادن كطريقة للتقوية والتسليح الخارجى.



شكل (15)مقاومة الضغط لبعض الأنواع من الخرسانة البلاستيكية .

9-2 PCC الخرسانة البوليسرية الاسمنتية

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 تقريبا 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.

9-3 PIC الخرسانة الاسمنتية المحقونة بالبوليمرات

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 المغلفة 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 والنفاذية ومقاومة الكيماويات.

ب - الخرسانة المغلفة جزئيا:

وقد تم عمل هذه الخرسانة كأسلوب لتبسيط عملية الغلفلة 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 الغلفلة بالبوليمر وبالتالى مقدار التشبع به. وبصفة عامة فإن الخرسانة المغلفة جزئيا تعطى نتائج عالية جداً وإن كانت أقل نسبيا من الخرسانة المغلفة كليا.

ج - الخرسانة المغلفة سطحيا:

وهي شبيهة بالخرسانةالمغلفة 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 الغلفلة مناسبة للجسور الطرق السريعة.

تطبيقات الخرسانة المغلفة بالبوليمر

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

من أهم عيوب الخرسانة التقليدية (٢٢٠٠ إلى ٢٥٠٠ كغم/م^{٣}) 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 هي نسبة عالية فى جميع الأحوال. ولذلك تم التفكير فى إنتاج وإستخدام خرسانة خفيفة وزنها أقل من ٢٠٠٠ كغم/م^{٣}. ولذلك فقد أمكن تصنيع خرسانة إنشائية تزن ١٤٠٠ إلى ١٩٠٠ كغم/م^{٣} بزيادة بسيطة فى التكاليف وكذلك إنتاج خرسانة نصف انشائية للبلوكات الداخليه تزن ٩٠٠ كغم/م^{٣} وتستعمل بكفاءة كحوائط داخليه. وعموماً فإن الخرسانة الخفيفة هي تلك التى يقل وزنها عن ٢٠٠٠ كغم/م^{٣}. 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 الناعمة) 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

10-1 Finless خرسانة خالية من المواد الناعمة

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

10-2 Lightweight Aggregate Concrete خرسانة الركام الخفيف

خرسانة الركام خفيف الوزن هى أكثر أنواع الخرسانات الخفيفة شيوعا وإستخداما 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 الممد (الليكا) - الفيرموكليت - الفوم (بوليسترين)

شكل(16) 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.

10-3 Cellular Concrete الخرسانة المهواة (ذات الخلايا)

وفى هذا النوع تتكون فقاعات من الغازات والهواء فى وسط الخرسانة وهي فى الحالة الطرية ويظل التركيب مسامى بعد أن تتجمد 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 (16)بعض انواع الركام خفيف الوزن

11-Heavy Weight Concrete الخرسانة الثقيلة

وهي خاصة بالوقاية من الإشعاع الذرى والنووى حيث تتناسب قدرة الخرسانة لإمتصاص هذه الإشعاعات مع وزنها أو كثافتها وبالتالى تكون جدران وبلاطات الأرضيات والسقوف 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 ٤٠٠٠كغم/م٣ ، وقد تستخدم قطع من الحديد كركام وتصل كثافة خرسانتة الى ٥٦٠٠ كغم/م٣. ومن الممكن أيضاً إستخدام النواتج الثانوية للفرن العالى . ويستخدم فى بعض الأحيان ركام من صخر سليكات الماغنسيوم وبصفة عامة فلابد لركام الخرسانة ثقيلة الوزن أن يوفى بمتطلبات الكثافة والتركيف 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.

12- Mass Concrete الخرسانة الكتلية

وهي خرسانة ذات كتل كبيرة مثل خرسانة السدود والخزانات الأرضية أو أى خرسانة يكون حجمها من الكبر بحيث يتطلب ذلك اخذ 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 اخذ 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 بدلًا من جزء من ماء الخلط و تسمى هذه العملية بالتبريد السابق.
- وجود انابيب 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.

****

تصميم الخلطات الخرسانية
Concrete Mix Design

١ - المقدمة

تصميم الخلطات الخرسانية يعنى تحديد القيم النسبية لمكوناتها Proportioning بما يتفق مع المتطلبات المطلوبة لعمل معين. ويكون ذلك باستخدام نسب ثبّتت 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 المقاومتها للأحمال أو المقاومة ألبرى) بالضافة لمتطلبات صناعة الخرسانة مثل السهولة المناسبةللمناولة او الصب Placing والتسوية النهائية (الانهاء Finishing) لسطح الخرسانة. وذلك مع مراعاة التكاليف الإقتصادية حسب نوع العمل الإنشائى المطلوب. وهذه الطرق الحسابية تهدف الى إستخدام المواد الموجودة Available Mterials لنحصل منها على خرسانة ذات خواص مطلوبة فى الحالتين الرطبة اوالطازجة 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.

٢ - كيفية بيان نسب مكونات الخرسانةExpressing Propoetions

❐تُبين مكونات الخرسانة من المواد الحبيبيةGranular Materials وهي الأسمنت والركام الناعم او الصغير والركام الخشن او الكبير على هيئة نسب Ratios وزنية او حجمية فمثلا عندما يقال خلطة ١ : ٢ : ٤ معناها:

الأسمنت	الرمل	الحصى
١	٢	٤

أى تحتوى على جزء من الأسمنت وجزئين من الركام الناعم وأربعة أجزاء من الركام الخشن. 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 الناعم قد يتغيرحجمه بأثير ظاهرة زيادة الحجم Bulking بالرطوبة.

- وقد تُبيَن 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 تُبيَن 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	حصى
٣٠٠ كيلوغرام	٠,٤ متر مكعب	٠,٨ متر مكعب

ومجموع هذة الكميات يعطى تقريبا بعد خلطها بالماء حوالى مترمكعب من الخرسانة الطرية او الطازجة.

- كما يمكن ان يُعبَر عن الأسمنت بعدد الاكياس للمتر المكعب من الخرسانة الطازجة وهذا العدد يسمى معامل الأسمنت Cement Factor فمثلاً خلطة يحتوى المتر المكعب منها على٦ اكياس أسمنت (الكيس يزن ٥٠كيلو غرام) وخلطة أخرى غنية يحتوى المتر المكعب.

منها على ٨ أكياس أو خلطة فقيرة يحتوى المتر المكعب منها على ٤ اكياس:

أسمنت	رمل	حصى
٦ اكياس	٠,٤م^{٣}	٠,٨ م^{٣}

- وتُبيَن 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. وأحيانا قد تُبيَن كمية ماء الخلط اللازمة للمتر المكعب من الخرسانة الطازجة مباشرة فمثلا خلطة:

أسمنت	رمل	حصى	ماء
٣٠٠ كغم	٠,٤م^{٣}	٠,٨ م^{٣}	١٥٠ لتر

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

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

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

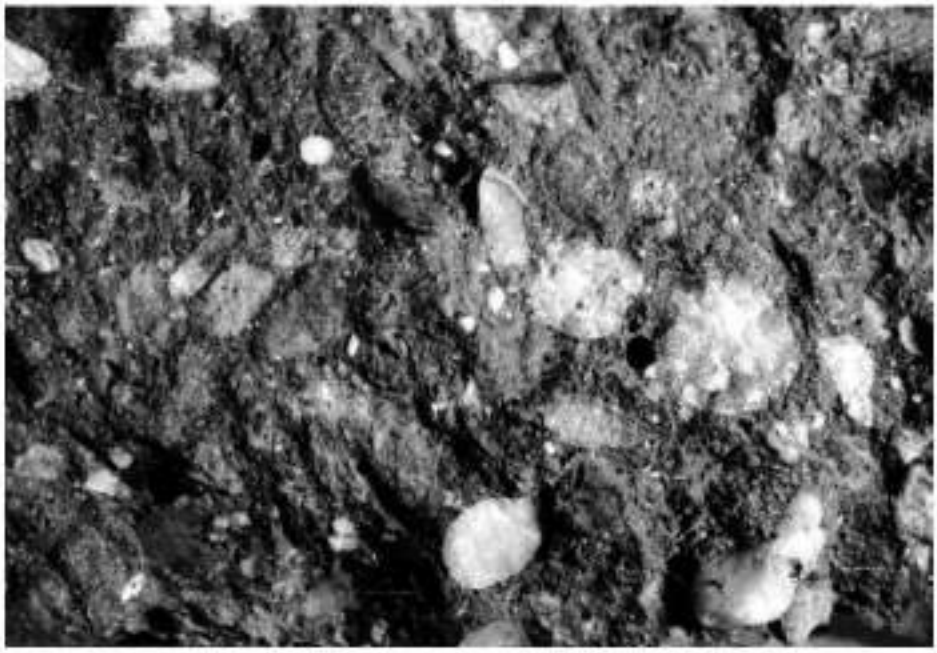
بها ٢ % ملدنات تعنى أن وزن الملدنات المستخدم = ٦ = ٠,٠٢ × ٣٠٠ كيلو غرام للمتر المكعب من الخرسانة الطازجة.

٣-العلاقة بين الركام والعجينة الاسمنتية Aggregate-Paste Relationship

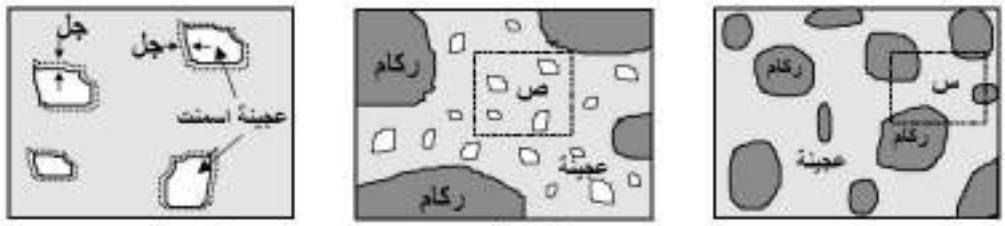
تتركب الخرسانة من عجينة أسمنتية (نشطة) وركام (خامل) وتعتمد مقاومة الخرسانة على مقاومة العجينة حيث أن مقاومة الركام كبيرة جداً بالنسبة لمقاومة العجينة. ولذلك فإن إنهيار الخرسانة التقليدية يكون دائماً فى العجينة وتمر الشقوق حول الركام. فإذا أمكننا إنتاج عجينة ذات مقاومة عالية جداً تقترب من مقاومة الركام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

ومن الجدير بالذكر ان قابلية تشغيل الخرسانة تنتج من تأثير احاطة وتخلخل وتلاصق 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 (٢). وكلما خفة درجة تركيز المعلق كلما زادت المسافة بين حبيبات الأسمنت وبالنتيجة تضعف بنية العجينة. وهذا يوضح أن مقاومة الانضغاط 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 الإماهه يستمر تكون الجل حول كل حبيبة حتى يتصل الجل ببعضه مكونا بنية العجينة.



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



شكل (٢) علاقة العجينة الأسمنتية بالركام.

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 ، الحصى) 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 بالاوزان المستخدمة عادة فى المنشآت طبقا لنوع الخرسانة أو طبقا لمقاومة الخرسانة للانضغاط هي كما يلى :

	الأسمنت	الرمل	الحصى	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

أسمنت	رمل	حصى
س كغم	٠,٤ م٣	٠,٨ م٣

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

❐ وعيوب هذه الطريقة تتلخص فى النقاط الآتية:

١ـ نسبة الماء / الأسمنت (م/س) غير محددة ومتروكة لظروف العمل.
٢ـ النسبة المذآورة لا تعطى مترأ مكعبا فى جميع الحالات وقد يصل الحجم أحياناً إلى ١,٢ م٣.
٣ـ نسبة الرمل /الحصى شبه ثابة وهي ١ : ٢ مع ملاحظة إهمال نوع الركام وتدرجه والمقاس الإعتبارى الأكبر له وكذلك إهمال معاير النعومة للرمل.
٤ـ لا يمكن الحصول على بيانات صحيحة لخواص الخرسانة الناتجة وكذلك لا يمكن توقع قيمة دقيقة لمقاومة الانضغاط لهذه الخرسانة.

ثانياً : طريقة المحاولة Trial Method

تعتمد هذه الطريقة على معرفة نسبة W\C فى الخلطة الخرسانية ويلزم عمل إختبارات مقارنة بين المواد المختلفة والخلطات المتباينة. وتتطلب هذه الطريقة وجود عينات من الأسمنت والحصى والرمل كما يجب تحديد نسبة W\C وكذلك المقاومة المطلوبة.

❐ وفيما يلى ملخص لخطوات تصميم خلطة خرسانية بطريقة المحاولة:

- تؤخذ كمية من الأسمنت فى حدود ٢,٥ كغم .
- 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 و الحصى 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 أشياش حديد التسليح (أيهما أصغر).
- تضاف تدريجيا كميات من الرمل واحصىوتخلط الخلطة جيداً ثم يحدد قوام الخرسانة إلى أن تصل إلى الخلطة التى تعطى القوام المطلوب.
- توزن بعدذلك الكميات المتبقية ومنها تحسب الأوزان المستعملة.
- تحسب الكميات بالوزن والحجم المطلوبة لعمل خلطة الخرسانة المعتمدة 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 بالكيلوغرام اللازم للمتر المكعب من الخرسانة .
S = وزن الرمل " " " " " " "
G = وزن الحصى " " " " " " "
W = وزن الماء " " " " " " "

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

علماً بأن حجم واحد متر مكعب من الخرسانة = ١٠٠٠ لتر من الماء.

وفى هذه الطريقة يجب تحديد كلاً من متطلبات مقاومة الخرسانة المتصلدة Strength و قابلية التشغيل Workability الخرسانة الطرية:

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

❐ وتتضح تلك الطريقة فى المثال التالى :

المطلوب تصميم خلطة خرسانية بحيث تكون الخرسانة الطرية لدنة القوام Plastic وبحيث تكون الخرسانة المتصلدة ذات مقاومة انضغاط بعد ٢٨ يوم تساوى ٢٤٠ كغم/سم^2. مع مراعاة أن ركام الخليط المستخدم يمر منه نسبة ٤٠ % من المنخل القياسى١٦/٣ مع العلم بأن :

الوزن النوعى للأسمنت =٣,١٥ كغم/سم^3.
الوزن النوعى للركام الرمل أو الحصى =٢,٦٥كغم/سم^3.
الوزن الحجمى للركام الرمل أو الحصى=١٧٠٠كغم/سم^3.

الحـل

أ ـ تُعين نسبة الركام الصغير (الرمل) إلى الركام الكبير(الحصى)يعتبر المار من المنخل القياسى (4.75) ١٦/٣هو الرمل والمحتجز عليه هو الحصى . إذن يتبين أن النسبة المئوية للرمل فى الخليط تساوى ٤٠% وبالتالى الحصى يساوى ٦٠%.

ملاحظة: هذه النسبة قد تفرض طبقا للخبرة والسوابق العملية ـ والنسبة الشائعة الإستخدام قد تفرض مباشرة على أساس٣٣ % للركام أي نسبة الرمل إلى الحصى تساوى ١ :٢

ب ـ تفرض آمية 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 للمتر المكعب = مقاومةالانضغاط بعد ٢٨ يوم كغم/سم^2 + ٥٠إلى ١٠٠

إذن كمية الأسمنت اللازمة للمتر المكعب = ٦٠ + ٢٤٠ = ٣٠٠ كغم/م ٣ .

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

فى هذا المثال نفرض أن (م/س) = ٠,٥

إذن كمية الماء للمتر المكعب من الخرسانة = ١٥٠ لتر.

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

المقاس الإعتبارى الأكبر للركام (مم)	قيمة W\C لمحتوى أسمنت كغم 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 الحصى = (٦٠ / ٤٠) من 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 كغم.

وزن الحصى ،، ،، ، ،، = ١٢٠٠ كغم.

❑ نسب الخلطة الخرسانية بالوزن :

أسمنت		رمل		حصى		ماء
٣٠٠كغم		٨٠٠ كغم		١٢٠٠كغم		١٥٠ كغم
١	:	٢,٦٧	:	٤	:	٠,٥

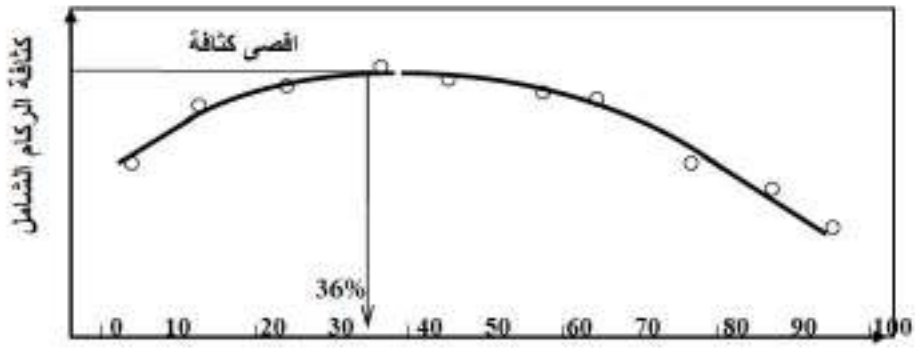
❑ نسبة الخلطة الخرسانية بالحجم :

أسمنت		رمل		حصى		ماء
$\frac{٣٠٠}{٥٠}$	اكياس	$\frac{٨٠٠}{١٧٠٠}$ م ٣		$\frac{١٢٠٠}{١٧٠٠}$ م ٣		١٥٠ لتر
٦ اكياس		٠,٤٧ م ٣		٠,٧١م ٣		١٥٠ لتر

وتجدر الأشارة إلى أن تعيين نسبة الركام الصغير (الرمل) إلى الركام الكبير (الحصى) يمكن أن يتم على أسس أخرى هامة 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 فمثلا : صفرر % ، ١٠ % ، ٢٠%، ....١٠٠ %مع تعيين وحدة الوزن لكل منها ثم نرسم القراءات على منحني 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 (٣) الذى يبين أن نسبة الرمل % ٣٦تعطى أقصى وحدة وزن لركام الخليط.



شكل (٣) الكثافة القصوى لركام 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 هي إستخدام المساحة السطحية لركام الخليط ومقاومة الانضغاط للخرسانة وذلك بمعرفة مقاومة الانضغاط المطلوبة للخرسانة أو قد تفرض المساحة السطحية للركام الخليط بقيمة تتراوح من ٢٤ إلى ٢٦ سم٢/غم التى تعطى غالبا أكبر قيمة للمقاومة. وبالتالى تحدد التدرج المطلوب أو نسبة الرمل فى الركام الشامل.

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 أكبرمن ٨٠٠كغم/سم٢.
- عندماتكون الخرسانة قليلة النفاذية ضرورية ومرغوبة.
- فى حالة خرسانة الضخ حتى لايحدث إنفصال حبيبي . عندما
- تكون الخرسانة معرضة لمواد كيميائية خاصة الكلوريدات.

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

مقاومة الخرسانة للانضغاط كغم/متر2	نسبة غبار السليكا المضافة كنسبة من وزن السمنت
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 الحصى 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 بالموقع

للمنشأ وعادة ما يستخدم 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 باستخدام الأسمنت المقاوم للكبريتات إلا فى حالة وجود نسبة عالية من أملاح الكبريتات فى التربة أو فى المياه الجوفية. أمافى الأحوال العادية أو الأحوال التى تكون فيها مقاومة الكلوريدات أهم من مقاومة الكبريتات فينصح باستخدام الأسمنت البورتلاندى العادى.

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

نسبة غبار السليكا المضاف كنسبة من وزن الأسمنت	محتوى الأسمنت كغم/م٣
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 الانضغاط للخرسانة كغم/سم٢	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%

7- يتم استخدام الحصى كركام كبير في الخلطه الخرسانية إذا كانت مقاومه الضغط المطلوبة لاتتجاوز ٧٥٠ أو ٨٠٠ كغم/سم٢ وفى حاله خرسانة ذات مقاومه 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 كغم/سم٢.

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

حيث:

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

f_c هي مقاومة الخرسانة كغم/سم٢

C هي وزن الأسمنت في المتر المكعب من الخرسانة ـ كغم

SF هي وزن غبار السليكا في المتر المكعب من الخرسانة ـ كغم

α عامل يتوقف على نوع الركام الكبير المستخدم ويساوى ١٣ ، ١٤ ، ١٥ للحصى 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/C وذلك لتحقيق مقاومة ضغط بعمر ٢٨ يوم = ١٠٠٠ كغم/سم٢ باستخدام محتوى أسمنت = ٤٧٥ كغم/م٣.

المقاومة المطلوبة = 1000كغم/سم٢		غبار السليكا كنسبة مئوية من وزن الأسمنت				
محتوى الأسمنت = 475 كغم/م٣		٥%	١٠%	١٥%	٢٠%	٢٥%
ـ أسمنت بورتلاندى عادى	حصى	٠,٢٤٤	٠,٢٣٧	٠,٢٣١	٠,٢٢٤	٠,٢١٦
ـ أسمنت مقاوم للكبريتات	حصى	٠,٢٥١	٠,٢٤٥	٠,٢٣٨	٠,٢٣١	٠,٢٢٣
ـ أسمنت فائق النعومة	حصى	٠,٢٦٦	٠,٢٥٩	٠,٢٥١	٠,٢٤٤	٠,٢٣٦
ـ أسمنت بورتلاندى عادى	دولوميت	٠,٢٦٢	٠,٢٥٦	٠,٢٤٩	٠,٢٤٢	٠,٢٣٥
ـ أسمنت مقاوم للكبريتات	دولوميت	٠,٢٧١	٠,٢٦٤	٠,٢٥٧	٠,٢٥٠	٠,٢٤٢
ـ 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 المادنات = 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 الانضغاط المطلوبة = ٨٠٠ كغم/سم^2
- الهبوط باستخدام المخروط القياسي = ١٠ سم
- نوع الأسمنت المستخدم مقاوم للكبريتات
- الركام المستخدم عبارة عن رمل طبيعي و دولوميت مقاس ١٤ملم ، والتدرج الحبيبي لكل من الرمل والدولوميت كما يلي:

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 800 كغم/سم^2 مع استخدام الدولوميت = ١٠% من وزن الأسمنت.

٢- محتوى الأسمنت المناظر لنسبة ١٠% من غبار السليكا = ٤٧٥ كغم/م^3.

∴ وزن غبار السليكا = ٤٧,٥ = ١٠% × ٤٧٥كغم/م^3.

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

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

٤- بتطبيق معادلة w/c مع مراعاة أن قيمة $\alpha = ١٥$ وقيمة $\beta = ١٢$ نحصل على نسبة الماء إلى المواد الأسمنتية = ٠,٢٩٤

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

٥- يتم خلط الركام الكبير مع الركام الصغير بحيث يحقق أن ٣٠% من وزن الركام الخليط يمر خلال المنخل رقم ٤,٧٥. إذن باستخدام النتائج في 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 هي وزن الدولوميت.

بحل المعادلة نحصل على وزن الدولوميت = ١٢٨٩ كغم

∴ وزن الرمل = ١٢٨٩× ٠,٣٧٥ = ٤٨٣ كغم

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

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

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 هي نتائج مختبرية لبعض الخلطات التى تم تنفيذها فى مختبرات كلية الهندسة.

الخلطة رقم ١

المطلوب:

- مقاومة الانضغاط = ٤٠٠ كغم\م^{٢} .
- يشترط عدم إستخدام أية إضافات.
- الهبوط فى حدود ١٠ سم.

الخلطة المقترحة:

- أسمنت بورتلاندى عادى ٥٠٠ كغم/م^{٣} .
- نسبة الماء إلى الأسمنت = ٠,٤٣ (٢١٥ لتر ماء في المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الرمل إلى الحصى = ٠,٣٥ : ٠,٦٥ (وحصى مقاس ١٦ مم).

النتائج:

- الهبوط = ١٠ سم.
- مقاومة الانضغاط بعمر ٧ أيام = ٣٢٢ كغم/سم^{٢}.
- مقاومة الانضغاط بعمر ٢٨ يوم = ٤٠٥ كغم/سم^{٢} .
- مقاومة الانضغاط بعمر ٦٠ يوم = ٤٢٧ كغم/سم^{٢}.

الخلطة رقم ٢

المطلوب:

- مقاومة الانضغاط = ٤٠٠كغم\سم٢ .
- يمكن إستخدام إضافات.
- الهبوط فى حدود ١٠ سم ويستمر بدون فقد لمدة ساعة على الأقل.

الخلطة المقترحة:

- أسمنت بورتلاندى عادى ٤٥٠كغم/م٣ .
- نسبة الماء إلى الأسمنت = ٠,٤٦ (١١٧لترماء فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الرمل إلىالحصى = ٠,٣٥ :٠,٦٥(وحصى مقاس ١٦ مم) .
- إستخدام ٣% ملدناتASTM type G .

النتائج:

- الهبوط الأولى = ١٤ سم
- الهبوط بعد ساعة = ١٠ سم.
- مقاومة الانضغاط بعمر ٧ أيام = ٣٧٥ كغم/سم٢ .
- مقاومة الانضغاط بعمر ٢٨ يوم = ٤٤٥ كغم/سم٢ .
- مقاومة الانضغاط بعمر ٦٠ يوم = ٤٩٠ كغم/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 (١٤٤ : ٠,٣٢ = لتر ماء فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الرمل الى الحصى= ٠,٣٥ : ٠,٦٥ (رمل خرش وحصى مقاس ١٦ سم).
- إستخدام ٣% ملدنات ASTM type G .

النتائج:

- الهبوط = ٨ سم.
- مقاومة الانضغاط بعمر ٧ أيام = ٤٦٠ كغم/سم٢ .
- مقاومة الانضغاط بعمر ٢٨ يوم = ٥٥٠كغم/سم٢.
- مقاومة الانضغاط بعمر ٦٠ يوم = ٥٧٥ كغم/سم٢.

الخلطة رقم ٥

المطلوب:

- مقاومة الانضغاط = ٨٠٠كغم/سم٢.
- الهبوط فى حدود ٥ سم.

الخلطة المقترحة:

- أسمنت بورتلاندى عادى ٥٠٠ كغم/م٣ .
- غبار السليكا ١٥% من وزن الأسمنت (٧٥ كغم 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 الانضغاط بعمر ٧ أيام = ٧١٠كغم/سم٢.
- مقاومة الانضغاط بعمر ٢٨ يوم = ٨٥٠ كغم/سم٢.

الخلطة رقم ٦

المطلوب:

- مقاومة الانضغاط = ٢٠٠كغم/سم٢.
- الهبوط فى حدود ١٠ سم.

الخلطة المقترحة الأولى بدون إضافات:

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

النتائج:

- الهبوط = ١٠ سم
- مقاومة الانضغاط بعمر ٧ أيام = ١٢٥كغم/سم٢ .
- مقاومة الانضغاط بعمر ٢٨ يوم = ٢٢٠ كغم/سم٢ .
- مقاومة الانضغاط بعمر ٦٠ يوم = ٢٣٠ كغم/سم٢.

الخلطة المقترحة الثانية بإستخدام إضافات:

- أسمنت بورتلاندى عادى ٢٠٠كغم/م٣ .
- نسبة الماء إلى الأسمنت = ٠,٥٩ (١١٨لتر ماء فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الرمل إلىالحصى = ٠,٣٥: ٠,٦٥ (حصى مقاس ١٦ سم) .
- إستخدام٣ % ملدناتASTM type G .

النتائج:

- الهبوط = ١٠,٥ سم
- مقاومة الانضغاط بعمر ٧ أيام = ١٥٥كغم/سم٢.
- مقاومة الانضغاط بعمر ٢٨ يوم = ٢٠٥ كغم/سم٢.
- مقاومة الانضغاط بعمر ٦٠ يوم = ٢٢٠ كغم/سم٢.

****

خواص واختبارات الخرسانة الطرية

Properties and Testing of Fresh Concrete

١ـ المقدمة

تمر الخرسانة لحظة إضافة الماء لها وحتى إنتهاء عمرها الإفتراضى بالمراحل الثلاثة الآتية:

أ-الخرسانة الطرية

وهي الخرسانة التى تبدأ من لحظة إضافة الماء إلى مكونات الخرسانة الجافة وحتى لحظة حدوث زمن التجمد الإبتدائى. وتمتاز هذه المرحلة بالقدرة على الخلط والنقل والصب.

ب- الخرسانة الخضراء

وهي الخرسانة المتكونة فى الفترة من بدايةالتجمد الأسمنت وحتى بداية تصلد الخرسانة أى فى حدود ٢٤ ساعة. وفى هذه المرحلة لا يسمح للخرسانة بالخلط والنقل والصب لأنها تكون قد تجمدة وإنها لا تقوى على تحمل أى نوع من الإجهادات .

ج - الخرسانة المتصلدة

وهي تبدأ بتصلد الخرسانة (أى عند عمر ٢٤ ساعة) وحتى نهاية عمرها الإفتراضى وتمتاز هذه المرحلة بأنها بداية زيادة المقاومة الرئيسية للخرسانة (مقاومة الانضغاط) وقدرتها على مقاومة الأحمال بمرور الزمن .

وتتوقف خواص الخرسانة على التركيب البنائى لها والذى بدوره يتوقف على نوع المواد المكونة للخرسانة وكميتها كذلك النسب بينها وأيضاً مدى تجانس هذه المواد وتوزيعها وكيفية تماسكها مع بعضها وكذلك تتوقف خواص الخرسانة أيضاً على الظروف التى تتم فيها عملية تصلد الخرسانة. كما تتوقف جودة الخرسانة أيضاً على بعض خواص الخلطة الخرسانية والتى تجعلها قابلة للتشغيل والتشكيل والصب والدمك بأقل جهد ممكن وبصفة عامة فإن خواص الخرسانة وهي فى حالتيها الطرية والمتصلدة يجب أن تحقق المواصفات والشروط الخاصه لكل نوع من الخرسانة على حده.

٢ - اخذ عينات الفحص للخرسانة الطرية

يجب أن تكون العينة الكلية المأخوذة من الخرسانة الطرية ممثلة تماماً للخلطة كما يجب أن لا يقل حجمها عن ٣٠ لتر(٠,٠٣ متر مكعب) وتتكون هذه العينة من كميات مأخوذة من أماكن متفرقة من الخلطة. وتحضر العينة من الخلطة المجهزة فيموقع العمل Job site بالخلط اليدوي أو من الخلطة المجهزة بالخلاط الميكانيكى . وفى الحالة الأولى تجمع أجزاء العينة الكلية من اماكن متفرقة موزعة توزيعاً منتظماً فى الخلطة مع تجنب جرف الخلطة حيث يحتمل تواجد الإنفصال الحبيبى للخرسانةSegregation . أما فى حالة الخرسانة المخلوطة خلطاً ميكانيكيا فيفرغ الخلاط على دفعات متساوية تقريبا وتحضر أجزاء العينة من ثلاث كميات على الأقل تؤخذ أثناء تفريغ الخلاطة.

وتنقل العينة بعد ذلك إلى مكان الإختبار وتخلط خلطا تاما على سطح غيرمنفذ للماء بمجرفه أو ما يماثله لضمان تجانسها وبذلك تكون العينة معدة للإختبار مباشرة .و يجب مراعاة حماية عينة الإختبار من التأثيرات الجوية مثل الشمس والرياح والأمطار والأتربة وذلك فى الفترة بين تحضير العينة وإجراء الإختبارات التى يجب أن لا تزيد عن١٥ دقيقة ويراعى أن تسجل مع كل عينة البيانات التالية:

- تاريخ ووقت أخذ عينة الإختبار.
- الطريقة المستخدمة فى خلط الخرسانة.
- نسب مكونات المواد المكونة لخلطة الخرسانة.
- مكان الخلط.
- درجة الحرارة والظروف الجوية.

ويلاحظ أن خواص الخرسانة الطرية المطلوبة لمنشأ خرسانى معين تحدد طبقا لطبيعة المنشأ وكذلك أبعاد القطاعات الخرسانية وكثافة التسليح وتكنولوجيا تصنيع الخرسانة من حيث طريقة الخلط والنقل والصب والرص والمعالجة.

٣ - الخواص الرئيسية للخرسانة الطرية

للخرسانة الطرية أربعة خواص رئيسية هي:

١- قوام الخلطة الخرسانية	Consistency
٢- قابلية التشغيل	Workability
٣- الإنفصال الحبيبى	Segregation
٤- النزيف (النضح)	Bleeding

١- القـــوام Consistency

❐ تعريف القوام:

- يعبر قوام الخرسانة الطرية عن درجة بلل الخرسانة Degree of Wetness فمثلاً يقال خرسانة جافة القوام Dry أو صلبة القوام Stiff أو لدنة القوامPlastic أو مبتلة القوامWet أو رخوة القوام Sloppy.

- ويمكن القول بأن قوام الخرسانة يعبر عن السيولة النسبية للخرسانة Relative Fluidity أى أنه يبين النسبة بين كمية ماء الخلط وكمية المواد الجافة بالخرسانة.

❐ الغرض من تحديد القوام:

هو ضمان الحصول على خرسانة ذات درجة سيولة أو لدونة تتناسب مع مختلف الأعمال الإنشائية. كما أنه من أهم وأبسط الخواص التى تساعد على التأكد من إنتظامية خلطات الخرسانة الطازجة وتجانسها وضبط جودتها وذلك قبل الصب مباشرة.

❐ العوامل التى تؤثر على القوام:

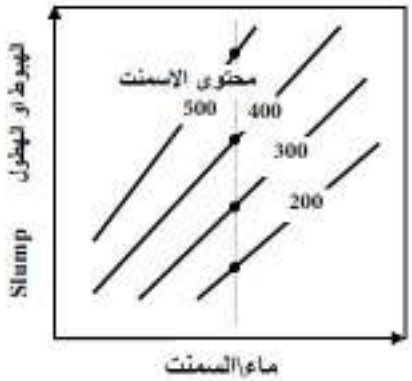
- نسبة مكونات الخرسانة: من ماء ورمل وحصى وأسمنت حيث يزداد الهبوط بزيادة محتوى الماء فى الخلطة. أو بزيادة نسبة الأسمنت. أو لصغر نسبة الرمل إلى الحصى أنظر شكل ١.

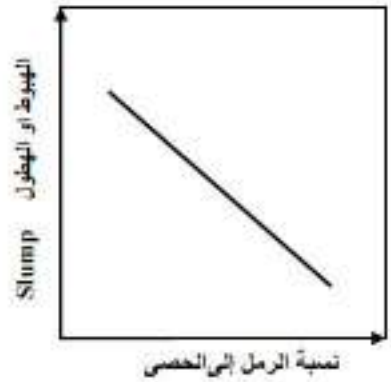
- نعومة الأسمنت (المساحة السطحية للأسمنت) حيث يزداد الهبوط بزيادة المساحة السطحية للأسمنت وحتى حوالى ٢٠٠٠ سم^{٢}/غم ثم تقل بعد ذلك بشرط ثبوت جميع العوامل الأخرى فى الخلطة الخرسانية كما هو مبين بالمنحنى شكل١.

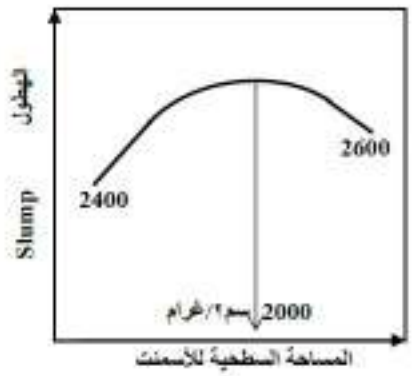
- المقاس الإعتباري الاكبر للركام حيث يزداد الهبوط بزيادة ذلك المقاس ويقل كلما صغر حجم الحبيبات.

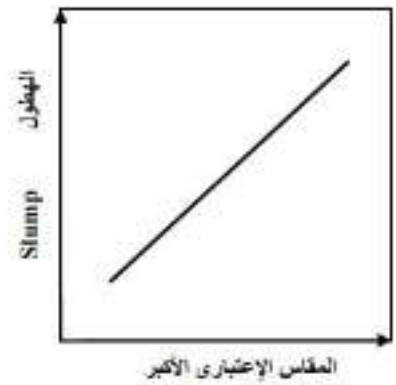
- الزمن بين الإنتهاء من خلط الخرسانة وبين إجراء إختبار الهبوط حيث يقل الهبوط بزيادة ذلك الزمن كما في الشكل ١ .

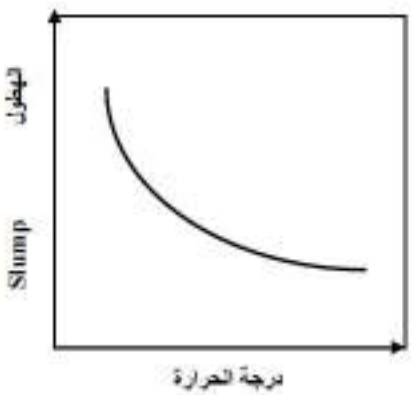
- حرارة الجـو: حيث يقل الهبوط كلما زادت حرارة الجو نتيجة تبخر جزء من ماء الخلط.
- الإضـافات :تعمل الإضافات على تحسين قوام الخرسانة بدرجات متفاوته وأهم هذه الإضافات الملدنات Superplasticizers وهي مواد سائلة تضاف إلى الخلطة بنسبة ١ - ٣% من وزن الأسمنت.

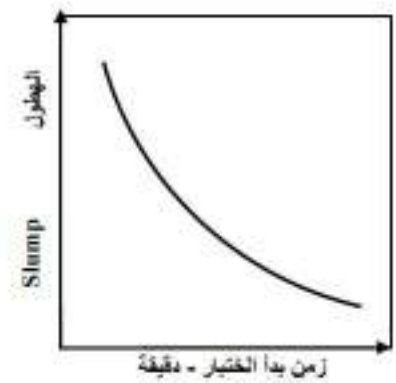












شكل (١)العوامل التى تؤثر على قوام الخرسانة.

❐ طرق تعيين القوام:

يوجد ثلاثة طرق رئيسية لتعيين قوام الخرسانة وهي:

* هطول او هبوط الخرسانة بعد إزالة قالب التشغيل .Slump Test
* إنسياب الخرسانة الطرية بعد تعرضها لإهتزازات ترددية .Flow Test
* اختراق جسم معدني للخرسانة تحت تأثير وزنة .Ball Penetration Test

أولاً: اختبار الهبوط Slump Test

- الغرض من الاختبار: تحديد قوام الخلطة الخرسانية بتعيين مدى هبوطها بعد تشكيلها على هيئة مخروط ناقص وذلك إما فى المعمل أو فى موقع التنفيذ. وذلك للتأكد من نسب مكونات الخلطة الخرسانية حيث أن أي تغيير فى نسبة الأسمنت أو كمية الماء والركام يؤثر على قيمة الهبوط. ويعتبر هذا الاختبار من أبسط وأفضل الوسائل لضبط الجودة فى معامل الخلط وفى مواقع التنفيذ.

- قالب الاختبار: عبارة عن مخروط ناقص ومصنوع من معدن متين بسمك١,٥ ملم على الأقل مفتوح من الاعلى ومن الاسفل ، قطر فتحته العليا ١٠سم والسفلى٢٠ سم وإرتفاعه٣٠ سم كما بشكل (٢).

- قضيب الدمك: وهو سيخ من الصلب بقطر ١٥ملم وطول ٦٠ سم.

شكل (٢) قالب اختبار الهبوط وقضيب الدمك.

- طريقة إجـراء الاختبار:

- ينضف السطح الداخلي للقالب بحيث لا توجد به أى مياه عالقة أو آثار خرسانية.
- يوضع القالب على سطح أفقى أملس غير مُنفذ للماء على أن يثبت جيدًا
- يملاء القالب على ثلاث طبقات إرتفاع كل منها يساوى ثلث إرتفاع القالب تقريباً على أن تدمك كل طبقة بواسطة قضيب الدمك ٢٥ مرة موزعه تقريبا على السطح وبشرط أن ينفذ القضيب إلى الطبقة التى تحتها.
- بعد الانتهاء من دمك الطبقة العليا للقالب يسوى سطحها مع حافة القالب.
- يرفع القالب بعد ملئه مباشرة فى إتجاه رأسى وببطء وعناية كما بشكل (٣).
- يقاس مقدار الهبوط Slumpبعد رفع القالب مباشرة وهو الفرق بين إرتفاع القالب وإرتفاع رأس عينة الخرسانة الطرية كما بشكل (4) يتم توصيف القوام إما جاف أو صلب أو لدن أو مبتل أو رخو وذلك طبقاً لقيمة الهبوط كما موضح بجدول(1) .

أما الجدول(2) فيوضح قيم استرشاديه للقوام ودرجة الدمك فى بعض الإنشاءات المختلفة.

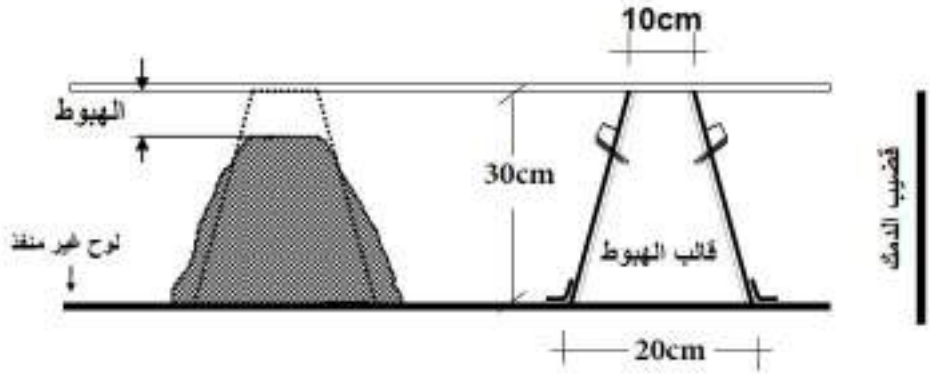
ملاحظـــات:

- يجب أن لا يزيد المقاس الإعتبارى الأكبر للركام المستخدم عن ٤٠ ملم.
- يجب أن لا تزيد الفترة بين إنتهاء الخلط وبداية إجراء الإختبار عن دقيقتين.
- تحدث ثلاثة أشكال مختلفة لحالة الهبوط فقد يكون هبوطاً حقيقياً True Slump أو هبوط قصShear Slump أو إنهيار Collapse وكمافى الشكل (٥) و (٦) .
- يراعى اعادة الإختبار على عينة أخرى فىحالة حدوث إنزلاق جانب Slipping فى العينة أو إنهيار .Collapse إذا تكرر ذلك فى حالة إعادة الإختبار فيقاس الهبوط و تسجيل ذلك مع النتيجة.

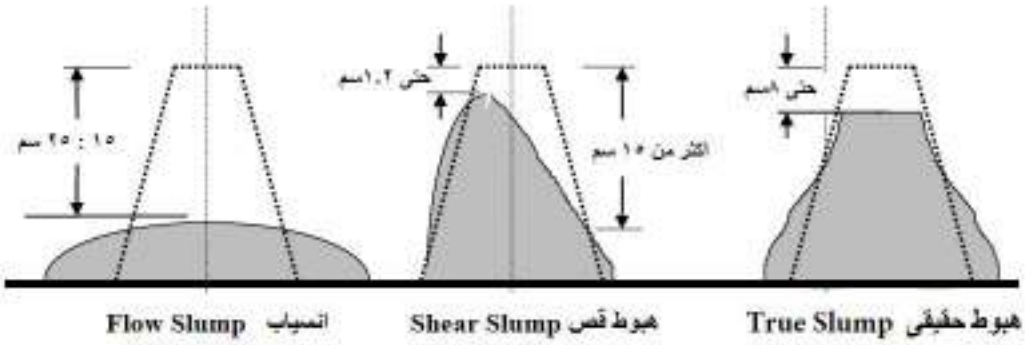
جدول (١) قيم الهبوط المناظرة لدرجات قوام الخرسانة المختلفة.

الهبوط ملم	صفر-٢٠	١٠-٤٠	٣٠-١٢٠	١٨٠-٢٢٠	١٠٠-٢٠٠
قوام الخلطة الخرسانية Consistency	جاف Dry	صلب Stiff	لدن Plastic	مبتل Wet	رخو Sloppy

شكل (٣) رفع القالب بعد ملئه فى إتجاه رأسى.



شكل (٤) قياس الهطول لتحديد قوام الخرسانة الطرية .



شكل (٥) أشكال الهبوط المختلفة.

شكل (٦)نموذج للهبوط الحقيقى.

جدول (٢) القوام ومحتوى الأسمنت ومقاس الركام المناسب للأنواع المختلفة من الإنشاءات.

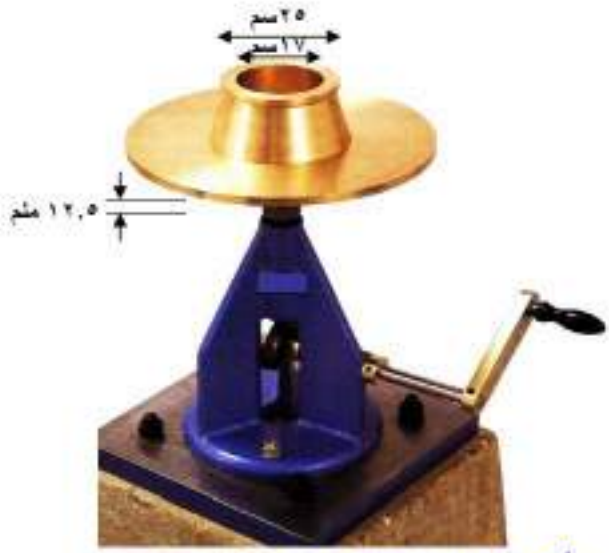
نوع العنصر الإنشائي	درجة الدمك	الهبوط ملم
خرسانة كتلية.	دمك ميكانيكي	صفر - ٢٥
القواعد الخرسانية خفيفة التسليح متوسطة التسليح. صبات خرسانية خفيفة التسليح.	دمك ميكانيكي	٢٥ : ٥٠
صبات خرسانية متوسطة و عالية التسليح. صبات خرسانية خفيفة التسليح.	دمك ميكانيكي دمك يدوي	٥٠ : ١٠٠
صبات خرسانية كثيفة التسليح.	دمك خفيف	١٠٠ : ١٢٥
أساسات حصيرة وخرسانة قابلة للضخ مع استخدام إضافات كيميائية فائقة (ملدنات أو ملدنات فائقه)	دمك خفيف	١٢٥ : ٢٠٠

و تجدر الإشارة أنه فى حالة الخرسانة ذات درجة السيولة العالية أو التى يزيد فيها الهبوط عن ٢٢ سم مثل الخرسانة ذاتية الدمك فإنه يتم قياس انسياب الهبوط وهو القطر المتوسط للخرسانة المنسابة بعد رفع مخروط الهبوط . وفى الخرسانة ذاتية الدمك فيشترط أن لا يقل انسياب الهبوط عن ٦٠ : ٧٠ سم كما في الشكل (٧).

شكل (٧)انسياب الهبوط فى الخرسانة ذاتية الدمك.

ثانياً اختبار الانسياب Flow Test

يختص هذا الاختبار بتعيين النسبة المئوية لانسياب الخرسانة والتى تُعبر عن حالة القوام وذلك بإجراء إهتزاز ترددى لمخروط ناقص من الخرسانة موضوع على لوح معدنى وتسجيل مدى إنتشار أو انسياب الخرسانة كنسبة منوية من القطر الأفي لقاعدة المخروط.



شكل (٧) جهاز الإنسياب لتحديد القوام.

الأجهزة :

- قالب الختبار : وهو عبارة عن قالب معدنى على شكل مخروط ناقص ويكون هذا القالب مفتوحا من أعلى ومن أسفل بمستويين عموديين على محور المخروط.
- قرص الإنسياب (Flow Table) ويثبت القرص على قاعدة ثابته بإرتفاع من ٥٠ـ٤٠٠ سم بوزن ١٥ كغم على الأقل.

طريقة إجراء الإختبار:

١ـ ينظف القرص جيداً بالماء ثم يجفف بعناية حيث لا يبقى به أثر لماء التنظيف.

٢ـ يوضع القالب مثبتاً فى وسط القرص وذلك بالضغط على مقبضيه باليد.

٣ـ يملىء القالب على طبقتين إرتفاع كل منهما يساوى نصف الإرتفاع تقريبا على أن ترص كل طبقة بواسطة قضيب الرص القياسى ٢٥ مرة موزعة تقريبا بالتساوى على سطح المقطع المستعرض للقالب بشرط أن يَنفُذ القضيب إلى الطبقة التى تليها يراعى أن يكون نصف عدد ضربات الدمك فى إتجاه مائل إلى الخارج والنصف الثانى فى إتجاه رأسى.

٤ـ بعد الانتهاء من دمك الخرسانة للطبقة العليا للقالب يسوى سطحها مع حافة القالب بالمسطره مع مراعاة ملء القالب تماماً.

٥ـ تُزال الخرسانة الزائدة التىسقطت على قرص الإختبار عند تسوية السطح ثم ينظف جيداً حول قالب الإختبار.

٦ـ يُرفع القالب المعدنى بعد ملئه مباشرة من الخرسانة بإنتظام فى إتجاه رأسى.

٧ـ يرُفع القرص ويخفض بمعدل منتظم لمسافة ١٢,٥ ملم (١/٢انج) وذلك ١٥ مرة فى مدى حوالى ١٥ ثانية.

٨ـ تقاس قاعدة الخرسانة المنسابة نتيجة الرفع والخفض المذكورة ويكون القياس لقطر القاعدة فى ٦ إتجاهات مختلفة ثم يؤخذ متوسط هذه القراءات ليمثل قطر الإنسياب لقاعدة المخروط الخرسانى بعد إنسياب الخرسانة.

٩ـ تحسب النسبة المئوية لإنسياب الخرسانة (لأقرب ٥ ملم) باعتبارها النسبة المئوية لزيادة قطر الإنسياب عن قطر القاعدة الأصلية وكما يلى:

$$\text{النسبة المئوية للانسياب} = \frac{\text{قطر الإنسياب (سم)} - ٢٥}{٢٥} \times ١٠٠$$

حيث أن قطر القاعدة الأصلي للمخروط الخرسانى يساوى ٢٥ سم

ويعتبر اختيار الإنسياب اختبارا معملياً فى معظم الحالات نظراً لعدم سهولة تواجد الجهاز فى موقع العمل. ويمثل الجدول الآتى النسب المئوية للإنسياب عند درجات القوام المختلفة.

جدول (٣) العلاقة بين قوام الخلطة والإنسياب.

النسبة المئوية للانسياب	صفر-٢٠%	١٥ - ٦٠%	٥٠-١٠٠%	٩٠ - ١٢٠ %	١١٠-١٥٠ %
قوام الخلطة الخرسانية Consistency	جاف Dry	صلب Stiff	لدن Plastic	مبتل Wet	رخو Sloppy

ثالثاً: إختبار كرة الإختراق (كيلى) Ball Penetration Test

وهذه الطيقه يحدد بها قوام الخرسانة بيسر ودقة عاليين وهو اختبار مشابه للهابط إلا أنه أسهل منه وأسرع . و يتكون الجهاز أساساً من ثقل على شكل نصف كرة نصف قطرها ١٥سم ووزنها ١٣,٦ كغم يتصل بها يد عليها مقياس مدرج والكل ينزلق من فتحة داخل إطار كما فى شكل (٩) ويمكن وضع هذا الإطار على سطح الخرسانة المراد قياس قوامها كما أن هذا الإطار يصلح فى نفس الوقت لإستخدامه كمستوى ثابت للمقارنة وقت الاختبار ويلاحظ أن جميع أجزاء الجهاز تصنع الصلب أو أى معدن مشابه.

طريقة إجراء الاختبار:

يمكن وضع الخرسانة فى وعاء أو يمكن إجراء الإختبار والخرسانة فى مكانها داخل الفرم (القالب) بعد صبها مباشرة ، وفى الحالتين يجب ألا يقل سمك الخرسانة عن ١٥ سم وأن يكون لها سطحاً مستوياً بأقل بعد يساوى ٣٠ سم. ويجب جعل سطح الخرسانة مستوياً وناعماً.

يوضع الجهاز بعناية فوق سطح الخرسانة مع رفع اليد إلى أعلى وجعل الإطار يرتكز برفق فوق السطح ثم تترك اليد لتنزلق داخل الإطار. تُقرأ مسافة إختراق الثقل داخل الخرسانة مباشرة على اليد المدرجة لأقرب ٥ ملم .يؤخذ متوسط عدة قراءات فى أماكن متفرقة. وتفيد هذه الطريقة فى بيان ومقارنة قوام الخرسانة عند صبها مباشرة داخل القالب.

شكل (٩) جهاز كرة كيلى لقياس القوام.

٢- القابلية للتشغيل Workability

تعريف :

القابلية للتشغيل هي خاصية الخرسانة الطرية التى تبين السهولة التى يمكن بها صب ومناولة الخلطة الخرسانية كما تبين درجة تجانسها ومقاومتها للإنفصال الحبيبى.

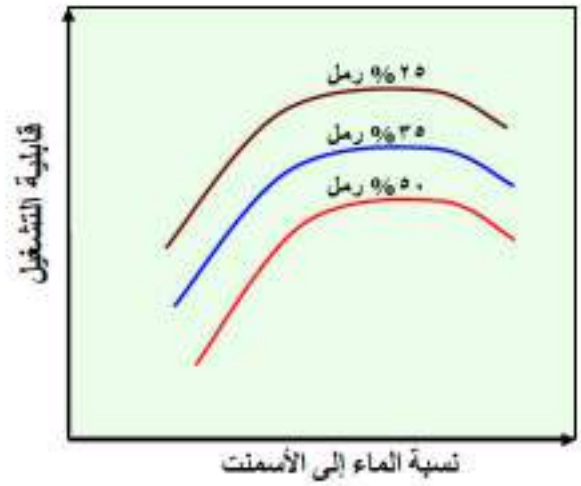
العوامل التى تؤثر على القابلية للتشغيل للخرسانة:

١- الركام:

- ❑مقاس الركام: زيادة نسبة الرمل او الركام الناعم تزيد من الإحتكاك وبالتالى تزيد صلابة الخلطة كما في الشكل (١٠) .
- ❑ شكل حبيبات الركام: الحبيبات المدورة أكثر قابلية للتشغيل بينما الحبيبات الزاوية والمقلطحة والغير منتظمة صعبة التشغيل.
- ❑ حالة السطح: تقل درجة التشغيل بسبب خشونة السطح مثل حالة الأحجار المكسرة.
- ❑ المسامية : تقلل زيادة المسامية من حركة الحبيبات وتزيد من الإحتكاك الداخلي بينها وتقل قابلية التشغيل .
- ❑ المقاس الإعتبارى الأكبر : إزدياد حجم الحبيبات يقلل من القابلية للتشغيل وممكن ذلك يكون معتمداً على كيفية صب الخرسانة وطبيعة المنشأ. (أفضل مقاس للخرسانات المسلحة هو ١٥ إلى ٣٠ ملم و فى حالة خرسانة الطرق ٥٠ الى ٧٠ ملم).

٢- الأسمنت:

- ❑ نوعه: حيث تؤثر طرق صناعة الأسمنت على التشغيلية نتيجة تغيرتسب المركبات وتفاعلها مع الماء في كل نوع.
- ❑ نعومته: زيادة نعومة الأسمنت يزيد من درجة تشغيل الخرسانة ولكن تكاليف طحن وتنعيم الأسمنت مكلفة جداً بحيث لا توازى المكسب فى زيادة درجة التشغيل.
- ❑ خواص العجينة: نسبة الركام إلى الأسمنت حيث تؤثر هذه النسبة على القابلية للتشغيل بدرجات متفاوته تعتمد على عدة عوامل مختلفة مثل المساحة السطحية ونصف قطر الركام والحجم.



شكل (١٠) تأثير نسبة الركام الصغير فى الركام الشامل على القابلية للتشغيل.

٣- الماء:

فى الخلطات الفقيرة بالأسمنت فإن زيادة الماء لا يؤثر تأثيراً كبيراً على القابلية للتشغيل أما فى الخلطات الغنية فإن زيادة الماء لها تأثير كبيرا وحساس على القابلية للتشغيل.

٤- نسبة الماء/ الأسمنت:

صغر نسبة W\C تعطى خرسانة جافة وزيادة هذه النسبة لدرجة معينة ينتج عنها خرسانة لها درجة تشغيل أفضل ولكن الزيادة الكبيرة فى نسبة الماء ينتج عنها خرسانة ذات تشغيلية رديئة نظراً لسيولتها كما في الشكل (١١).

٥- الإضافات:

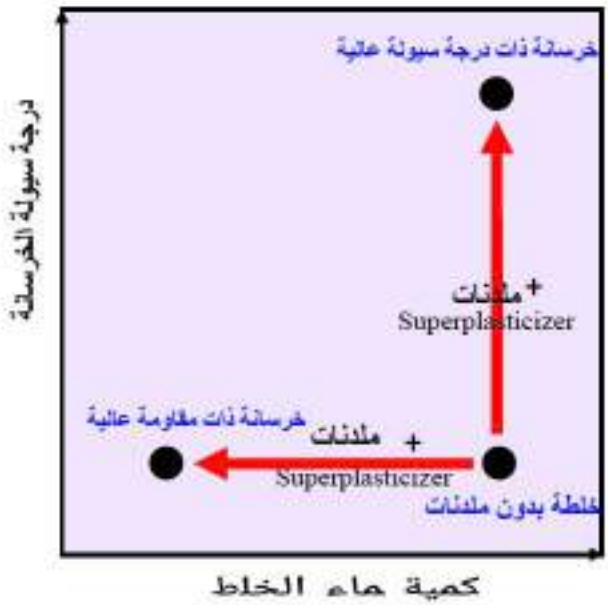
تعمل الإضافات على تحسين درجة التشغيل للخرسانة بدرجات متفاوته وأهم هذه الإضافات هي:

الملدنات Superplasticizers وهي مواد سائلة تضاف إلى الخلطة بنسب ١: ٣% من وزن الأسمنت.

- مواد مسحوقة ناعما وتعمل على تحسين الخلطة مثل بودرة الحجر الجيرى.
- مواد جيلاتينية تضاف إلى الخلطة.

٦- الهواء المحبوس:

يعمل الهواء المحبوس فى الخرسانة على تحسين القابلية للتشغيل وذلك إذا كانت نسبته تتراوح من ٣% إلى ٧%.



شكل (١١) تأثير الإضافات ونسبة الماء فى الخلطة على القابلية للتشغيل.

❐ طرق تعيين القابلية للتشغيل:

توجد عدة طرق لتعيين قابلية الخرسانة للتشغيل ومن اهم هذه الطرق:

اختبار عامل الدمك Compacting Factor Test

طريقة فى بى "Vebe (VB) Test

أولاً: إختبار عامل الدمك Compacting Factor Test

يجرى هذا الإختبار لتحديد درجه قابلية تشغيل الخرسانة الطريه وهذا الإختبار مبني على أساس أن الجهد اللازم لدمك الخرسانة يعبر عن مدى القابلية للتشغيل. ويبين الشكل الموضح الجهاز المستخدم فى هذا الإختبار.

طريقه اجراء الاختبار:

- توضع الخلطة الخرسانية فى المخروط العلوى بواسطة المجرفة ويسوى سطحها مع حافة المخروط.
- يفتح الباب الموجود فىأسفل المخروط العلوى بحيث يسمح بهبوط الخرسانة تحت تأثير وزنها فقط إلى المخروط السفلى.
- تكرر نفس الخطوات بالنسبة للمخروط السفلى فتمر الخرسانة إلى الإسطوانة.
- بعد الإنتهاءمن ملء الإسطوانة يسوى سطحها وتنظف جوانبها وحوافها الخارجيه ثم توزن ويعين وزن الخرسانة المالئة للإسطوانة وهو وزن الخرسانة المدموكه جزئياً = و.
- يعاد ملء الإسطوانة من نفس الخلطة الخرسانية على طبقات على أن ترص كل طبقة يدويا أوميكانيكياً حتى تملأ تماما بالخرسانة ثم توزن ويعين وزن الخرسانة المالئة للإسطوانة وهو وزن الخرسانة المدموكه آلياً = ك.

$$\text{عامل الدمك} = \frac{\text{وزن الخرسانة المدموكة جزئيا (نتيجة هبوطها)}}{\text{وزن الخرسانة المدموكة كلياً (نتيجة دمكها)}} = \frac{\text{و}}{\text{ك}}$$

وبمعرفة عامل الدمك يمكن تحدي درجة القابلية للتشغيل كما فى جدول (٤). ويعتبر إختبار عامل الدمك إختباراً معمليا وغيرمناسب لموقع العمل إلا فى المنشآت الكبيرة. وتستخدم هذه الطريقة لقياس قابلية التشغيل لجميع الخلطات الخرسانية بإستثناء الخلطات منخفضة القابلية للتشغيل والخلطات الخشنة لتعذر الحصول على نتائج دقيقة لهذه الخلطات.

شكل (١٢) جهاز عامل الدمك.

جدول (٤) القابلية للتشغيل معبراً عنها بعامل الدمك.

درجة التشغيلية	عامل الدمل	الهبوط (سم)	الإستعمال المناسب للخرسانة.
منخفضة جدا	٠,٧٨ صفر	٢,٥	الطرق المستخدم فيها الهز بالماكنات العادية أو اليدوية
منخفضة	٠,٨٥	٢,٥_٥	الطرق المستخد فيها الهز بالماكنات اليدوية أو الهز اليدوى إذا كان الركام مستديرا أو زاويا. الخرسانة الكتلية فى الأساسات بدون اهتزازات أو الخرسانة المسلحة التى بها تسليح خفيف بواسطة الدمك
متوسطة	٠,٩٢	٥_١٠	بالهز الأسقف المدموكة باليد أو الخرسانة المسلحة ذات التسليح الثقيل والمدموكة باليد أو بالهزازات.
عالية	٠,٩٥	١٠_١٧,٥	للصبات ذات التسليح الكثيف جداً غير المناسب للهز.

ثانياً : طريقة فى بى Vebe (VB) Test

وهذا الاختبار تعديل لاختبار إعادة التشكيل بحيث ألغيت الإسطوانة الداخليه به وتم الدمك بالهز بدلاً من الرج والشكل (١٤) يوضح رسماً لهذا الجهاز. ويفترض أن إعادة التشكل قد إكملت عندما يغطى اللوح الزجاجي الخرسانة تماما وعندما تتلاشى كل الفراغات فى الخرسانة ويحدد هذا بالنظر الذى يعتبر أحد عيوب إجراء الإختبار. ويتم الدمك بواسطة منضدة إهتزاز بها حمل غير متمركز ويدور بسرعة ٣٠٠٠ لفة فى الدقيقة وبتعجيل قدره ٣ج إلى ٤ج حيث ج هو تعجيل الجاذبية الأرضية. ويفرض أن كمية الطاقة اللازمة لتمام الدمك تمثل الدرجة التشغيلية للخليط معبراً عنها بالزمن اللازم بالثانية لإعادة التشكل الكامل. وفى بعض الأحيان يعمل تصحيح قدره V2/ V1 حيث V2 هو حجم الخرسانة بعد الإهتزاز و V1 هو حجمها قبل الإهتزاز. وهذا الجهاز أميز من جهاز عامل الدمك حيث قد تلتصق بعض الخرسانة الجافة فى القوالب الفحص وهو مناسب جداً فى حالة إختبار الخرسانة الجافة أو الخرسانة التى بها ألياف. و قد يستخدم أيضاً للتعبير عن القوام.

شكل (١٤) جهاز فى بى.

٢- الانفصال الحبيبي Segregation

الانفصال الحبيبي هو انفصال مكونات أي خليط غير متجانس (مثل الخرسانة) بحيث يصبح توزيع هذه المكونات غير منتظم. ويوجد نوعان من الإنفصال الحبيبى للخرسانة:

١- إنفصال الحبيبات الكبير من الركام نتيجة لكونها أكثر ترسباً .وذلك يكون فى الخلطات الجافة جدا وخاصه الفقيرة فى الأسمنت.

٢- إنفصال الأسمنت يحدث ذلك فى الخلطات المبتلة جداً.

❐ أسباب حدوث الانفصال الحبيبى:

١- الخلط: عند زيادة زمن الخلط عن الزمن اللازم والمناسب فقد يحدث إنفصال نتيجة قوة الطرد المركزية حوض الخلاط والذى ينتج عنه أن الركام الصغير يلتسق بالجدار والكبير يهبط الى أسفل. ولتلافى ذلك يجب عدم زيادة زمن الخلط عن الزمن المحدد لذلك. كذلك يجب عند تفريغ الخلاط أن لا تزيد مسافة التفريغ عن ١,٠ متر.

٢- النقل :عند نقل الخرسانة إلى موضع الصب يمكن حدوث إنفصال نتيجة الرج و التأرجح لعربات النقل وخاصه فى الخلطات المبتلة.

٣- الصب :يجب مراعاة عدم الصب من إرتفاعات عالية.

٤- الدمك :الدمك الزائد قد يسبب إنفصالاً حبيبياً.

❐ لتجنب الانفصال الحبيبي :

١- ينبغي العنايه بتصميم الخلطة الخرسانية وضبط مكوناتها عن طريق زياده المواد الناعمة مثل الأسمنت والركام الصغير وكذلك تقليل نسبة م/س مما يؤدي إلى تماسك اكبر للخلطة الخرسانية.

٢- استخدام إضافات تقليل ماءالخلط Superplasticizers.

٣- مراعاة عمليات الصناعة من خلط و نقل و صب.

٤- استخدام إضافات تحسين اللزوجه Viscosity Enhancing Admixtures.

٤- النضح Bleeding

النضح هو تكون طبقة من الماء على سطح الخرسانة المصبوبة حديثا بعد دمكها و تسويتها.

❐ أسباب حدوث النضح :

كثرالدمكاو الرص الذى يؤدي إلى هبوط المكونات الثقيلة (الركام) إلى أسفل وصعود العجينة الأسمنتية إلى أعلا وكذالك زياده ماء الخلط. وأضرار النضح تتلخص فى الآتى:

1- إحتواء الطبقة العليا على نسبة عاليةمن الماء مما يسبب وجود فراغات فى تلك الطبقة نتيجة تبخر الماء وبالتالى ضعف مقاومه الخرسانة.

2- عند صعود الماء إلى أعلا قد يحمل معه جزيئات ناعمة من الأسمنت تكون طبقة هشه على السطح بعد تبخر الماء وجفافه ولذلك يلزم إزالة هذه الطبقة قبل الإستمرار فى الصب.

3- تراكم طبقة رقيقة من الماء تحت سطوح الركام الكبير والحديد مما يؤدي إلى فراغات وضعف قوة التماسك بين الخرسانة و حديد التسليح.

❐ لمعالجه ظاهرة النضح :

يجب إستعمال كميه ماء خلط مناسبة وعدم إستعمال خلطات رطبه جدا" أو بها نسبة قليلة من المواد الناعمة مثل الأسمنت والرمل. كما إن إستخدام نسبة من الملدنات فى الخلطة يؤدي إلى تحسين خواص الخرسانة ويعمل على تقليل ماء الخلط وتلاشي ظاهرة النضح.

****

خواص و اختبارات الخرسانة المتصلدة

Properties and Testing of Hardened Concrete

١- مقاومة الانضغاط Compressive Strength

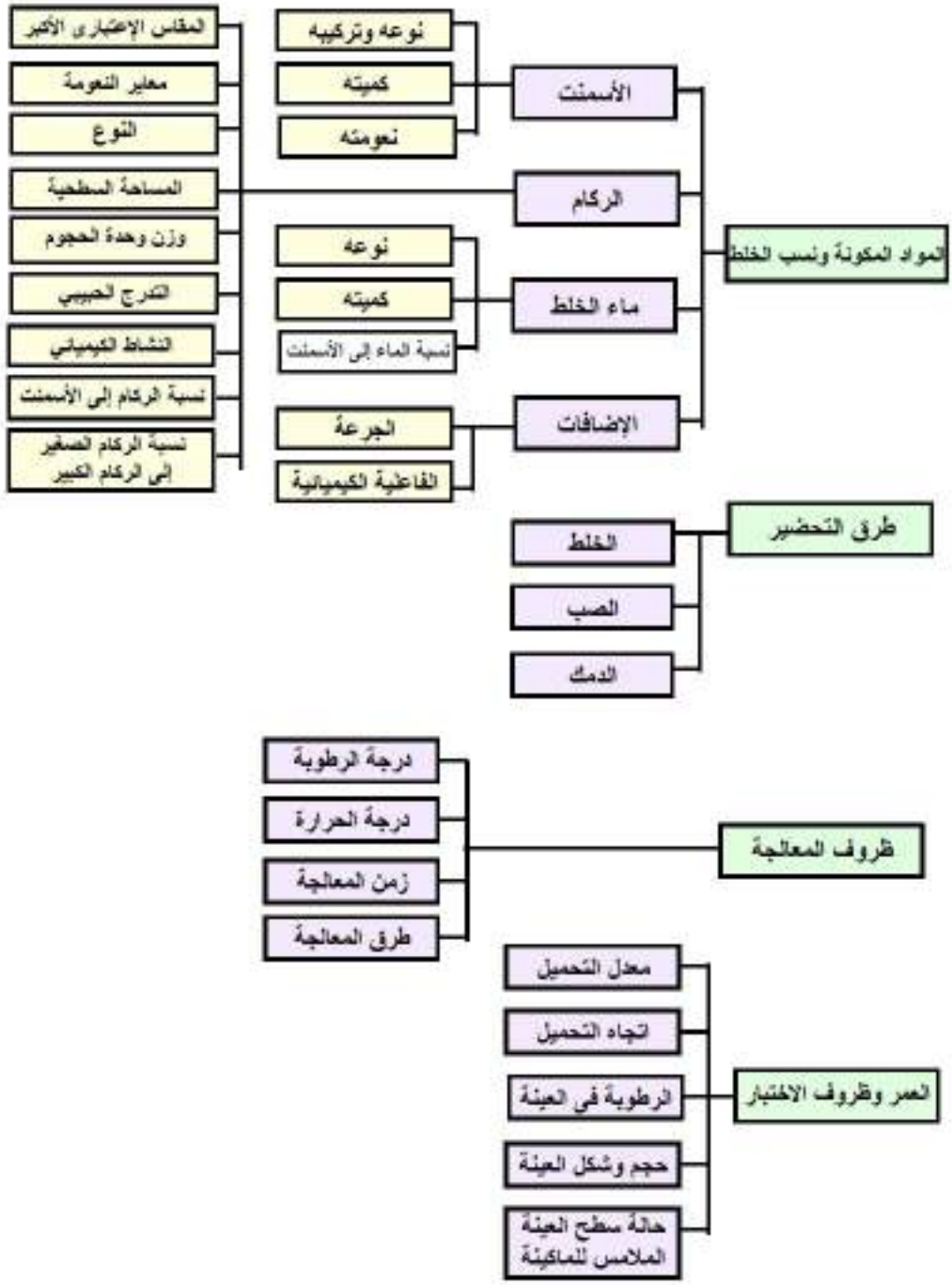
إن مقاومة الضغط هي اهم خواص الخرسانة المتصلدة على الإطلاق وهي تعبر عن درجة جودتها وصلاحيتها ، ومقاومة الضغط هي المقاومة الأم للخرسانة حيث أن معظم الخواص والمقاومات الأخرى مثل الشد و الانحناء والقص والتماسك مع حديد التسليح تتحسن وتزيد بزيادة مقاومة الضغط والعكس صحيح. لذلك يجرى اختبار الضغط بغرض التحكم فى جودة إنتاج الخرسانة فى موقع المشروع كما يستخدم هذا الاختبار فى أغراض التصميم الإنشائى لتحديد المقاومة المميزة Characteristic Strength وإجهاد التشغيل Working Stress للخرسانة فى الضغط الذى يؤخذ كنسبة من المقاومة القصوى للضغط. كما يفيد اختبار الضغط فى تحديد صلاحية الركام وماء الخلط للتعرف على تأثير الشوائب التى قد توجد بهما على مقاومة الضغط للخرسانة. والواقع حالياً أن مقاومة الضغط لخرسانة المنشآت التقليدية تتراوح بين ٢٥٠ ـ ٣٥٠ كغم /سم^2 أما بالنسبة للمنشآت الخاصة والوحدات سابقة التجهيز فمقاومة الضغط تزيد عن ذلك وتصل إلى ٤٠٠ ـ ٥٠٠ كغم /سم^2 والوحدات الخرسانية سابقة الإجهاد يجب أن تكون ذات مقاومة للضغط تزيد عن ٤٠٠ كغم /سم^2 وقد تصل إلى ٦٠٠ كغم /سم^2. وقد سبق الإشارة فى الفصول السابقة عن إمكانية صناعة الخرسانة عالية المقاومة (مقاومة الضغط أكبر من ٨٠٠ كغم/سم^2) والتى نأمل أن تأخذ طريقها إلى الواقع العملي في بلدنا.

١-١ العوامل المؤثرة على مقاومة الضغط

تتأثر مقاومة الضغط بعوامل عديدة ومتنوعة تتلخص بالرسم البياني شكل رقم (١) فى أربعة مجموعات رئيسية هى:

- ☐ المواد المكونة ونسب الخلط.
- ☐ طرق صناعة الخرسانة من خلط ونقل وصب ودمك.
- ☐ ظروف المعالجة.
- ☐ العمر وظروف الاختبار.

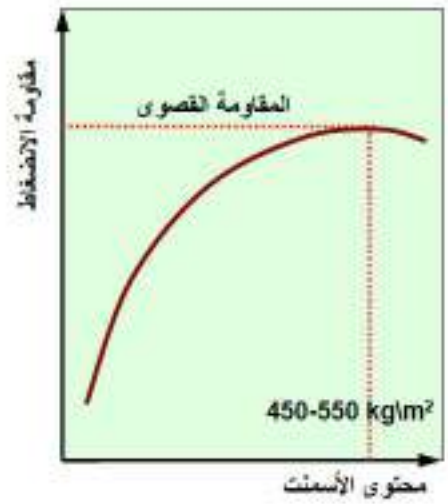
وفيما يلي شرح بإيجاز لبعض هذه العوامل.

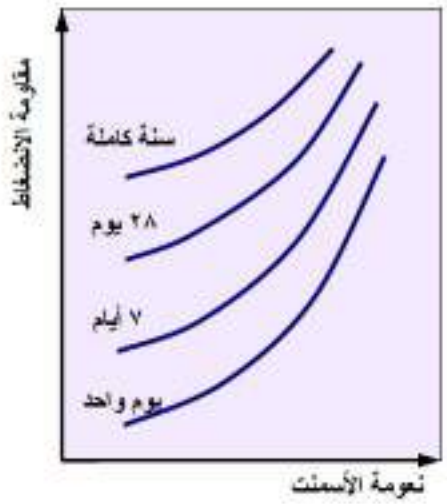


شكل(١) العـوامل التى تؤثر على المقاومة.

أولاً: تأثيـــر الأســـمنت

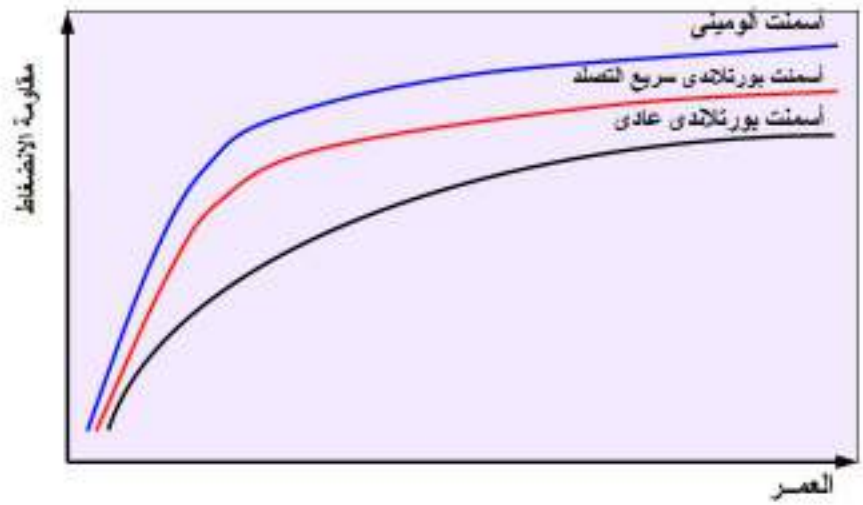
الأسمنت هو المكون الرئيسي الفعال الذى تتوقف عليه مقاومة الخرسانة وأهم العوامل المؤثرة فى الأسمنت هي كميته ونعومته وتراكيبه الكيميائي. فنجد أن مقاومة الخرسانة تزيد بزيادة محتوى الأسمنت وذلك حتى محتوى معين يقل عنده معدل الزيادة فى المقاومة ثم تتوقف الزيادة فى المقاومة بعد ذلك وربما تقل. وهذا المحتوى يختلف باختلاف نسب مكونات الخلطة وكذلك يتوقف على وجود أو عدم وجود إضافات كيمائية أو معدنية. وعموماً فقد وجد أن المحتوى الأقصى للأسمنت الذى يعطي أعلى مقاومة انضغاط للخرسانة بين ٤٥٠ و ٥٥٠ كغم\م^3 (شكل رقم (2. أما بالنسبة لنعومة الأسمنت فهي تؤثر تأثيراً كبيراً على مقاومة الخرسانة وخاصة فى الأعمار المبكرة حتى ٢٨يوم. بعد ذلك يقل معدل الزيادة فى المقاومة تدريجياً بتقدم عمر الخرسانة حتى يكاد ينعدم عند الأعمار المتأخرة جداً كما هو موضح في الشكل (٣).





شكل رقم (2) تأثير محتوى الاسمنت شكل رقم (3) تأثير نعومة الاسمنت

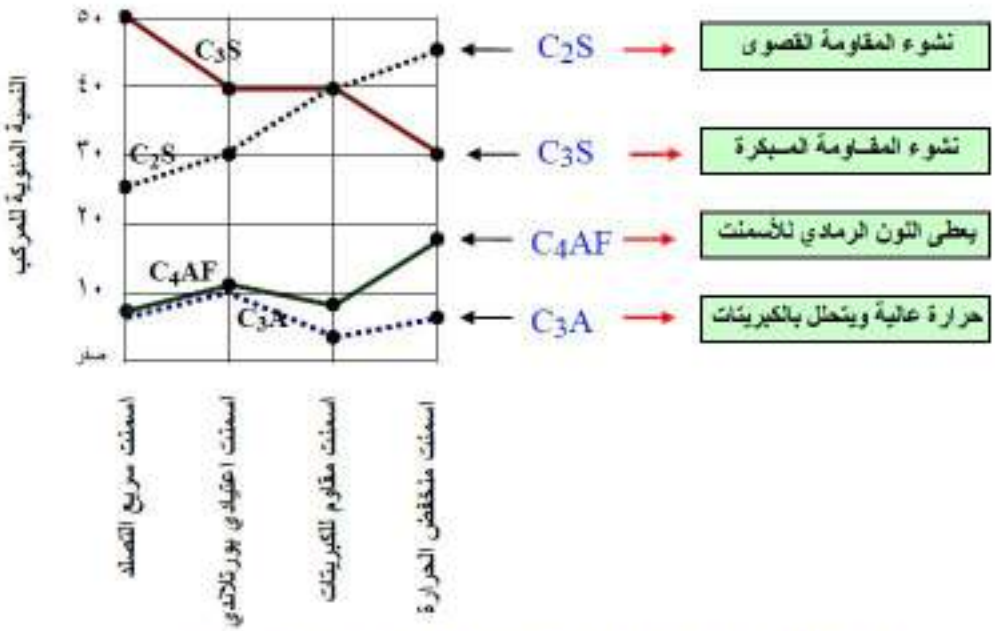
أما بالنسبة لتأثير التركيب الكيميائي للأسمنت فيعتمد ذلك بصورة كبيرة على نسب المكونات الرئيسية الأربعة للأسمنت وهى سيليكات ثنائي الكالسيوم C_2S وسيليكات ثلاثي الكالسيوم C_3S وثالث ألومينات الكالسيوم C_3A ورابع ألومينات حديد الكالسيوم C_4AF. أما العنصرين الأولين C_2S و C_3S فهما الذين يتحكمان فى المقاومة ويتراوح مجموع نسبتيهما حوالى ٧٥% . وعموماً فإن الأسمنت الذى يحتوى على نسبة عالية من C_3S يكتسب مقاومة أسرع من الأسمنت المحتوى على نسبة عالية من C_2S حيث أن C_3Sهو المركب المسئول عن المقاومة المبكرة للأسمنت. أما العنصر الثالث فى الأسمنت و هو ثالث ألومينات الكالسيوم فهو المسئول عن انبعاث حرارة عالية أثناء الخلط وهو المتسبب فى وجود الخواص غير المرغوبة فى الأسمنت مثل حدوث التغيرات الحجمية و التشققات و التدهور عند التعرض للكبريتات. إلا أن هذا العنصر موجود فى الأسمنت بحكم تواجده فى المواد الخام. أما العنصر الرابع وهو رابع ألومينات حديد الكالسيوم فهو عنصر خامل تقريباً ويحل محل العناصر النشطة فى الأسمنت وبالتالي فلا يرغب فى تواجده بنسبة عالية. وبالتحكم فى نسبة المكونات الرئيسية للأسمنت وكذلك نعومته يمكننا صناعة الأنواع المختلفة من الأسمنت مثل الأسمنت سريع التصلد والأسمنت البورتلاندى العادي والأسمنت فائق النعومة والأسمنت المقاوم للكبريتات ..... إلخ. والشكل رقم(٤) يوضح تأثير نوع الأسمنت حيث نجد أن الأسمنت السريع التصلد يظهر مقاومة مبكرة عالية ولكن بعد ثلاثة شهور تقريباً تكون المقاومة مساوية لتلك التى نحصل عليها من الأسمنت البورتلاندى العادي. جدول (١) وشكل (٥) يوضحان المكونات الكيميائية لأنواع الأسمنت المختلفة وكذلك تأثيرها على خواص الأسمنت.



شكل (4) تأثير نوع الاسمنت على مقاومة الانضغاط

جدول (1) خواص الانواع المختلفة للاسمنت

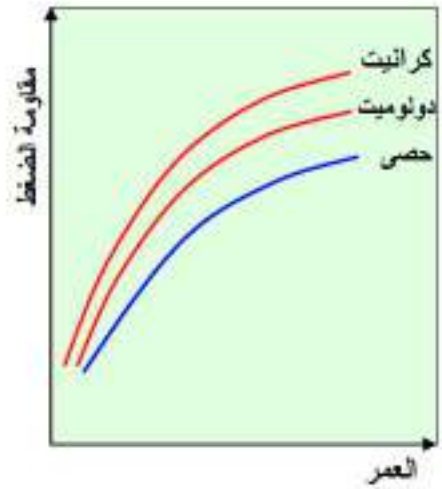
نوع الأسمنت	معدل زيادة المقاومة	الحرارة المنبعثة	الانكماش بالجفاف	مقاومة التشقق	المقاومة كبريتات	للكيماويات أحماض
بورتلاندى عادى	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	منخفض	منخفض
بورتلاندى سريع التصلد	عالي	عالي	متوسط	منخفض	منخفض	منخفض
بورتلاندى منخفض الحرارة	منخفض	منخفض	فوق المتوسط	عالي	متوسط	منخفض
مقاوم للكبريتات	منخفض/متوسط	منخفض/متوسط	متوسط	متوسط	عالي	منخفض
بورتلاندى حديدي	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	فوق المتوسط	فوق المتوسط



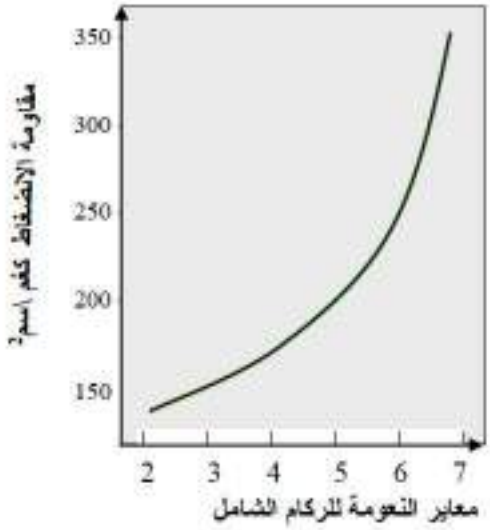
شكل (5) التركيب الكيميائي للانواع المختلفة من الاسمنت

ثانياً: تأثير الركام

الركام هو المادة المالئة بالخرسانة والتى يفترض أنها خاملة كيميائياً. وعموماً فإن مقاومة الخرسانة تتوقف على التماسك بين العجينة الأسمنتية والركام المستخدم حيث ينبغي أن تغلف العجينة الأسمنتية بكفاءة أسطح الركام المستخدم ومن ثم نجد أن نوع الركام وشكله ونعومته ومساحته السطحية وطبيعة سطحه من العوامل الرئيسية التى تؤثر على مقاومة الخرسانة. شكل (٦) يوضح تأثير نوع الركام على مقاومة الضغط حيث نجد أن الحجر الجيري أو الدولوميت يعطي مقاومة أكبر من الركام. كذلك يبين الشكل (٧) أن مقاومة الضغط تزيد بزيادة قيمة معايير النعومة للركام الشامل. أما المساحة السطحية للركام فتؤثر تأثيراً كبيراً على مقاومة الضغط حيث نجد أنه عند مساحة سطحية حوالى ٢٥ سم٢/غم فإننا نحصل على المقاومة القصوى التى تقل تدريجياً إذا زادت المساحة السطحية أو قلت عن ذلك كما هو موضح بالشكل (٨). ومساحة الركام السطحية تعتمد على نسبة الركام الصغير إلى الركام الكبير وكذلك على نعومة أو خشونة الركام المستخدم.



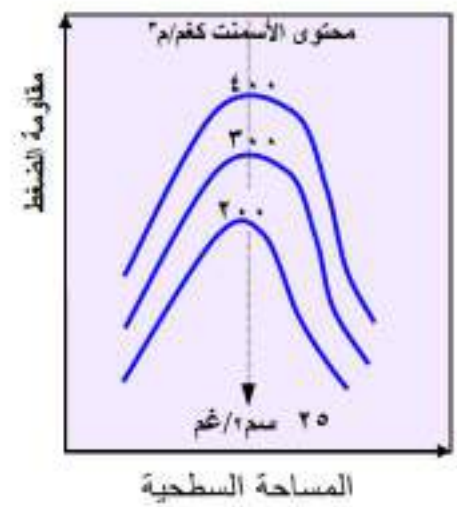
شكل (6) تأثير نوع الركام



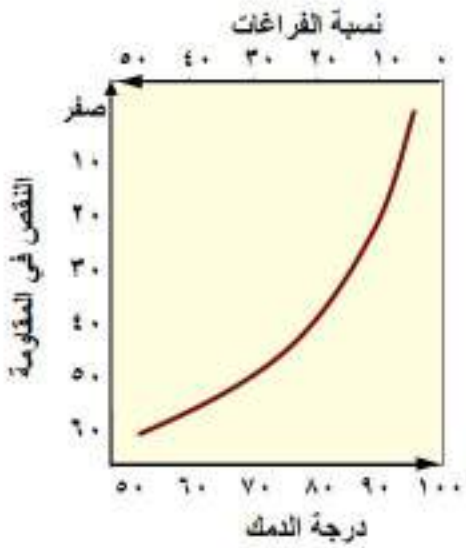
شكل (7) تأثير معيار نعومة الركام

ثالثاً: تأثير ماء الخلط و الدمك

إن تأثير نسبة الماء إلى الأسمنت (م/س) هو بلا شك من اهم العوامل التى تؤثر ليس فقط على مقاومة Strength الخرسانة بل أيضاً على متانتها Durability. وعموماً فإن تقليل الماء فى الخلطة إلى درجة معينة هو أساس الحصول على الخرسانة عالية المقاومة High Strength Concrete أو الخرسانة عالية الأداء High Performance Concrete وقد سبق الحديث في الفصل الخرسانة من المحاظرة الاولى عن تأثير نسبة (م/س) على الخرسانة وكذلك كيفية التحكم فى نسبة الماء فى الخرسانة باستخدام الإضافات الكيميائية (الملدنات). وقد وجد أنه عند درجة دمك محددة للخرسانة الطازجة فإن هناك نسبة معينة من م/س(تكون عندها مقاومة الخرسانة نهاية عظمى. وعموماً فإن مقاومة الخرسانة تتأثر تأثراً كبيراً بدرجة دمكها كما هو موضح فى الشكل رقم (٩) حيث أن الدمك الغير جيد يؤدى إلى وجود فراغات هوائية فى الخرسانه تعمل على تقليل المقاومة وتدهور الخرسانه.



شكل (8) تأثير المساحة السطحية للركام



شكل (9) تأثير الدمك

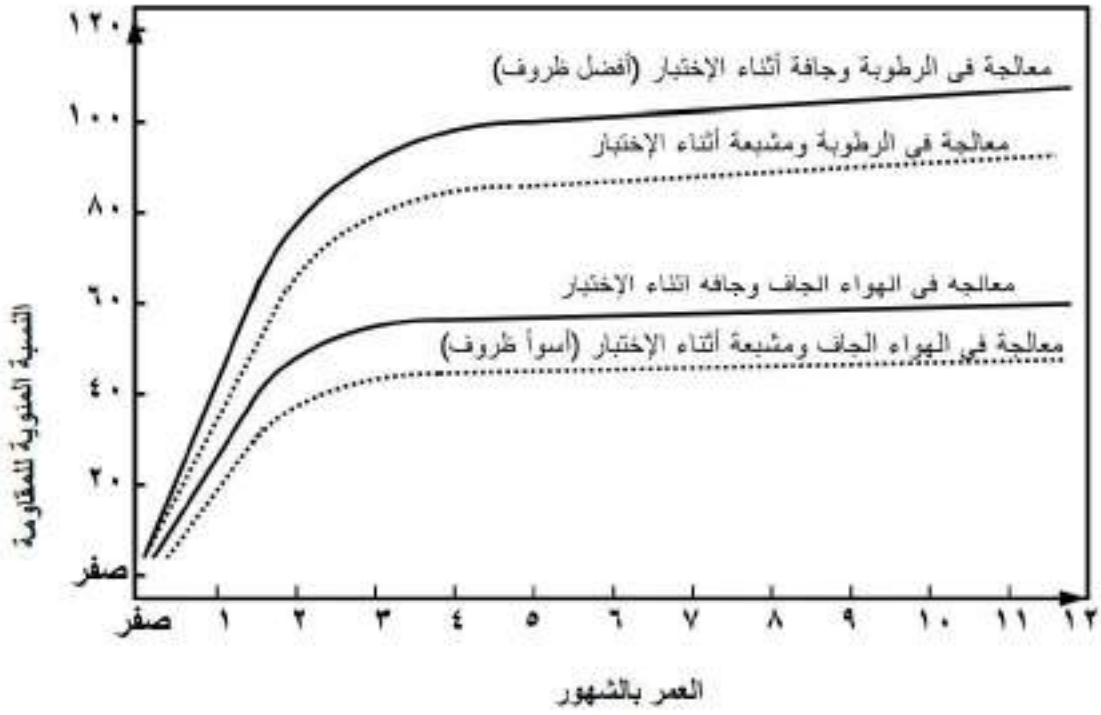
رابعاً تأثير العمر والمعالجة

إن زيادة مقاومة الخرسانة مع الزمن Strength Gain يتوقف بدرجة كبيرة على الظروف المحيطة بها وكذلك على ظروف المعالجة من حيث مدتها ودرجتي الرطوبة والحرارة. فكلما زادت فترة معالجة الخرسانة فى الرطوبة كلما زادت مقاومتها. كما أن الخرسانة المعالجة فى الهواء تظهر مقاومة أقل كثيراً من الخرسانة المعالجة تحت الماء. إن الخرسانة المعالجة فى الهواء مع تعرضها لدورات الجفاف يقيد عملية الإماهة وربما يوقفها ومن ثم تتوقف الزيادة فى المقاومة. ولقد أوضحت الاختبارات طويلة المدى على الخرسانة المعالجة فى الماء تحت درجة الحرارة العادية أن عملية الإماهة مستمرة حتى أعمار تصل سنوات عديدة ولكن بمعدل متناقص. ويتضح من الشكل (١٠) أن الخرسانة المعالجة فى الماء تظهر مقاومة أعلى بمقدار مرتين أو أكثر من مقاومة الخرسانة الغير معالجة. ولقد أوضحت الاختبارات أيضاً أن العينات الخرسانية المعالجة فى الهواء ومختبرة فى جو جاف تُظهر مقاومة أكبر من العينات المناظرة التى عُرضت للهواء نفس المدة ولكنها شُبعت بالرطوبة قبل الاختبار مباشرة. وعموماً فإن المعدل الذى تتحسن به المقاومة Rate of Strength Gain يكون كبيراً فى الأعمار المبكرة خاصة فى الأسابيع الأربعة الأولى ويقل تدريجياً مع تقدم العمر. ولذلك تم اعتبار المقاومة بعد ٢٨ يوم هي المقاومة القياسية للخرسانة.

ولقد أُجريت اختبارات عديدة على أنواع مختلفة من الخرسانة لدراسة مقاومة الضغط عند أعمار مختلفة وإيجاد العلاقة بينها. والواقع أن هناك علاقات كثيرة تربط مقاومة الخرسانة فى الأعمار المختلفة بمقاومتها عند ٢٨ يوم إلا أن جميع هذه العلاقات تقريبية وتعطى قيم استرشادية فقط. وفى جميع الأحوال ينبغي اختبار الخرسانة بعد ٢٨ يوم حتى نتأكد تماماً من قيمة مقاومة الخرسانة الفعلية. وتجدر الإشارة أن اختبار الضغط بعد ٢٨ يوم لا يعطي قناعة تامة عن حقيقة مقاومة الضغط لبعض أنواع الخرسانة وخاصة تلك المحتوية على إضافات كيميائية مثل معجلات أو مؤخرات الشك او التحمد وكذلك تلك المحتوية على مواد بوزولانية مثل غبار السيليكا وفى هذه الحالة ينبغي قياس المقاومة بعد ٥٦ يوم أو ٩٠ يوم على الأقل وذلك حتى تعطى صورة حقيقية عن المقاومة. وعموماً فإن بعض الكودات قد أعطت بعض القيم الاسترشادية (جدول ٢) للعلاقة بين مقاومة الضغط فى الأعمار المختلفة ومقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم وذلك فى حالة الخرسانة المصنوعة فى الظروف العادية والغير محتوية على إضافات.

جدول (٢) قيم استرشادية لنسبة مقاومة الضغط فى أعمار مختلفة.

عمر الخرسانة (يوم)	٣	٧	٢٨	٩٠	٣٦٥
أسمنت بورتلاندى عادى	٠,٤	٣/٢	١	١,١٨	١,٣٣
أسمنت بورتلاندى سريع التصلد	٠,٥٥	٦/٥	١	١,١١	١,١٨



شكل (١٠) معدل زيادة مقاومة الخرسانة مع الزمن فى ظروف معالجة مختلفة.

خامساً: تأثير شكل العينات على مقاومة الضغط

هناك ثلاثة أشكال شائعة للعينات الخرسانية التى تستخدم فى اختبار الانضغاط وهي : المكعبة والاسطوانية و المنشورية كما في الشكل (١١) وقد لوحظ معملياً أن المقاومة المقاسة لخلطة معينة من الخرسانة تختلف باختلاف شكل العينات المختبرة. كما دلت التجارب على أنه لنفس الشكل من العينات تختلف المقاومة المقاسة معملياً باختلاف مقاس العينات المختبرة.

ولقد أجريت عدة أبحاث معملية بغرض الوصول إلى شكل ومقاس موحد ومناسب للعينات الممكن استخدامها فى اختبار الضغط إلا أنه لا توجد حتى الآن طريقة نظرية أو رياضية لإعطاء حل جازم لهذه المشكلة وبذلك ظلت المواصفات الدولية مختلفة فيما بينها فى اختيار الشكل والمقاس المناسب لعينات اختبار الضغط فنجد أن المواصفات القياسية البريطانية تنص على استخدام العينات المكعبة مقاس ١٥,٨×١٥,٨×١٥,٨ سم بينما تنص المواصفات القياسية الأمريكية على استخدام العينات الاسطوانية مقاس ١٥×٣٠ سم ومن ناحية أخرى تنص المواصفات القياسية السويسرية على استخدام العينات المنشورية مقاس ١٥×١٥×٣٠ سم فى حين أن بعض دول وسط أوربا تشترط اختبار مجموعة عينات مكعبة بالإضافة إلى عينات منشورية من نفس الخلطة الخرسانية. ونظراً للاختلاف الواضح بين المواصفات القياسية الدولية بشأن شكل ومقاس عينات اختبار الضغط فإن الأبحاث العلمية أولت هذا الموضوع اهتماما كبيراً لمحاولة ربط المقاومة المستنتجة من أحد الأشكال بالمقاومة المستنتجة من الأشكال الأخرى. وتجدر الإشارة هنا إلى أنه نظراً لتزايد استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى وقتنا الحاضر فقد ظهر الميل لاستخدام عينات صغيرة مثل المكعب ١٠×١٠×١٠ سم والاسطوانة ١٠×٢٠ سم وذلك حتى تناسب سعات ماكينات الضغط المتاحة.

شكل (١١) الأشكال المختلفة من العينات الخرسانية المستخدمة فى الضغط.

ولقد بينت الاختبارات أن العلاقة بين مقاومة الانضغاط للمكعب ومقاومة الانضغاط للاسطوانة غير ثابته لأنها تتغير نتيجة اختلاف مقاومة الخرسانة ومقاس الركام الكبير وعوامل أخرى. ويعتبر تولد قوى الاحتكاك بين سطحي عينة الاختبار ورأس ماكنة الضغط من العوامل المؤثرة على تغير العلاقة بين مقاومة الضغط للعينة المكعبة و الاسطوانية و المنشورية حيث تؤثر قوى الاحتكاك على المقاومة الظاهرية للعينات المكعبة. بينما يحدث الانهيار في العينات الاسطوانية و المنشورية دون تأثير واضح لقوى الاحتكاك وبالتالي نجد دائماً أن مقاومة الضغط للعينة المكعبة أكبر من مقاومة الضغط للعينة الاسطوانية أو المنشورية. وسوف تتضح طبيعة تأثير هذا الاحتكاك على نتائج اختبارات الضغط فيما بعد. وتمتاز العينات الاسطوانية الشكل بأن توزيع الإجهادات على سطحها يكون منتظماً وبذلك تعطى إنعكاساً واضحاً لخواص الخرسانة. وإذا أخذنا المكعب القياسي (١٥×١٥×١٥) كأساس للمقارنة فإن الاختلاف في نتائج اختبار العينات المكعبة و الاسطوانية و المنشورية يكون كما هو موضح بالجدول (٣). غير أن النسبة الموضحة للمقاومة في الجدول (٣) تختلف باختلاف عمر الخرسانة عند اختبارها كما تختلف أيضاً باختلاف مقاومة الخلطة المختبرة وكذلك تتوقف على طبيعة المواد المكونة للخرسانة فنجد مثلاً أن نسبة مقاومة المنشور إلى مقاومة المكعب تزيد كلما كانت الخرسانة المختبرة بها نسبة أكبر من الرمل والمواد الناعمة.

جدول (٣) قيم استرشادية لمعامل التصحيح لنتائج مقاومة الضغط .

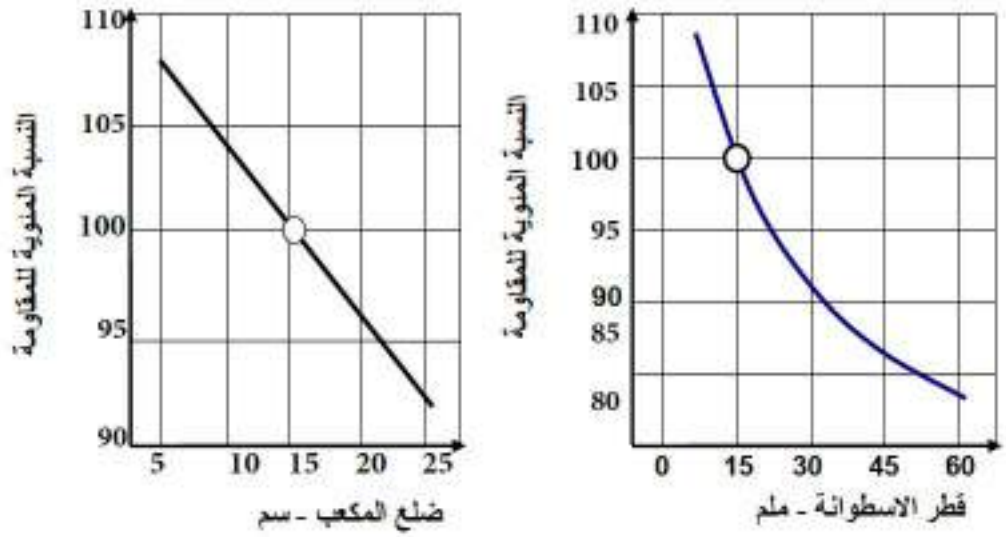
شكل القالب	الأبعاد (سم)	معامل التصحيح
مكعب	١٠×١٠×١٠	٠,٩٧
مكعب	١٥×١٥×١٥ أو ١٥,٨×١٥,٨×١٥,٨	١,٠٠
مكعب	٢٠×٢٠×٢٠	١,٠٥
مكعب	٣٠×٣٠×٣٠	١,١٢
اسطوانة	٢٠×١٠	١,٢٠
اسطوانة	٣٠×١٥	١,٢٥
اسطوانة	٥٠×٢٥	١,٣٠
منشور	٣٠×١٥×١٥ أو ٣١,٦×١٥,٨×١٥,٨	١,٢٥
منشور	٤٥×١٥×١٥ أو ٤٧,٤×١٥,٨×١٥,٨	١,٣٠
منشور	٦٠×١٥×١٥	١,٣٢

سادساً : تأثير المقاس على مقاومة العينات

وجد أن مقاومة الخرسانة للضغط تختلف بالنسبة للعينات المتشابهة فى الشكل والمختلفة فى الأبعاد ، فكلما زادت الأبعاد تقل مقاومة الضغط المقاسة معملياً كما في الشكل (١٢) .ولقد أدت هذه الظاهرة بالباحثين إلى محاولة عمل توحيد قياسي على أبعاد عينات اختبار الضغط سواء كانت مكعبية أو اسطوانية أو منشورية الشكل. وبالنسبة للعينات الاسطوانية الشكل نجد أن المقاومة المقاسة تتغير تبعاً لتغير مقاس الاسطوانة كما أنها تتغير أيضا تبعاً لاختلاف نسبة ارتفاع الاسطوانة إلى قطرها (ع/ق) ، ويوضح جدول (٤) عامل التصحيح لمقاومة الضغط الذى يضرب فى المقاومة التى يحصل عليها من العينات الاسطوانية غير القياسية وذلك بغرض حساب المقاومة المطلوب الحصول عليها من العينات القياسية المأخوذة من نفس الخلطة والتى يعادل ارتفاعها ضعف قطرها. و يتضح من جدول (٤) أن المقاومة التى تحصل عليها من العينات التى لها (ع/ق) أقل من ٢ تكون أكبر من المقاومة القياسية مما يستدعى ضربها بعامل تصحيح يقل بقيمته عن الواحد الصحيح تبعاً لنسبة (ع/ق).

جدول (٤) عامل تصحيح المقاومة المناظر لنسب (ع/ق) المختلفة للاسطوانة(ASTM C 457)

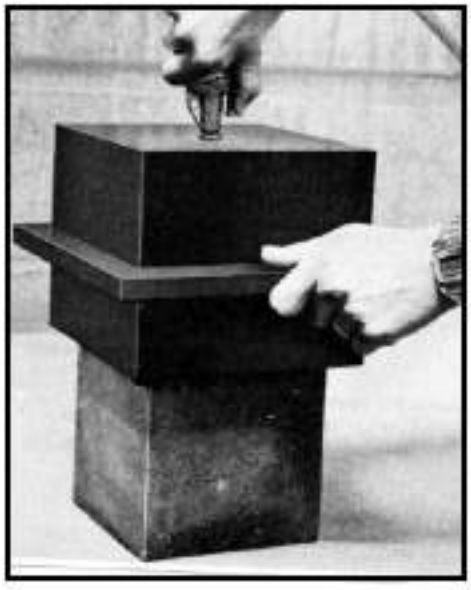
نسبة الارتفاع إلى القطر (ع/ق)	٢,٠	١,٧٥	١,٥٠	١,٢٥	١,١٠	١,٠٠	٠,٧٥	٠,٥٠
عامل تصحيح المقاومة	١,٠	٠,٩٨	٠,٩٦	٠,٩٤	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٧٠	٠,٣٠



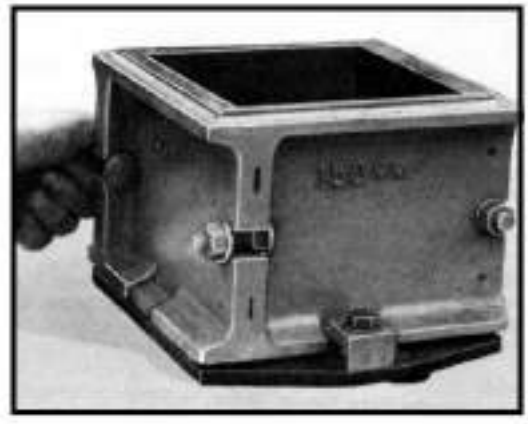
شكل (١٢) تأثر مقاومة الخرسانة بتغير مقاس العينة.

سابعاً: نوع قالب الصب

هناك عدة أنواع من القوالب يمكن إستخدامها لصب عينات إختبار الضغط سواء للعينات المكعبة أو الإسطوانية أو المنشورية الشكل. إلا أن أكثر هذه الأنواع شيوعاً هي القوالب المعدنية ثم تأتىقوالب البلاستيك والكرتون وقوالب ورق الشمع البرافينى .ويؤثر نوع مادة القالب المستخدم على مقاومة الضغط المقاسة معملياً تبعاً لقابلية القالب لإمتصاص الماء وقابليته لتسريب الماء الأسمنتى من خلال الجدران أو إحتمال حدوث تغير فى شكل القالب Deformation خلال زمن تصلد الخرسانة. ومع أن القوالب المعدنية تُعتبر أفضل الأنواع لتجهيز عينات الإختبار إلا أن النوعين الآخرين يمتازان بقلة التكاليف وسهولة الإستعمال فى موقع العمل. وتُظهر العينات المصبوبة فى قوالب من البلاستيك مقاومة أقل من تلك التى تُظهرها مثيلاتها المصبوبة فى القوالب المعدنية .وجدير بالذكر أن المواصفات القياسية تنص على إستخدام القوالب المعدنية لتجهيز عينات إختبار الضغط إلا أنه قد يلزم فى بعض الظروف إستخدام أنواع أخرى من القوالب وفى هذه الحالة تصحح المقاومة المقاسة بضربها بعامل التصحيح المناسب. شكل (١٨) يبين الشكل القالب المكعب المعدنى أثناء تربيط جوانبه بينما يبين شكل (١٤) القالب المناظر من البلاستيك أثناء تفريغ العينة الخرسانية منه بضبط الهواء.



شكل (١٤) قالب مكعب بلاستيك.



شكل (١٣) قالب مكعب معدنى.

ثامناً: ظروف التحميل

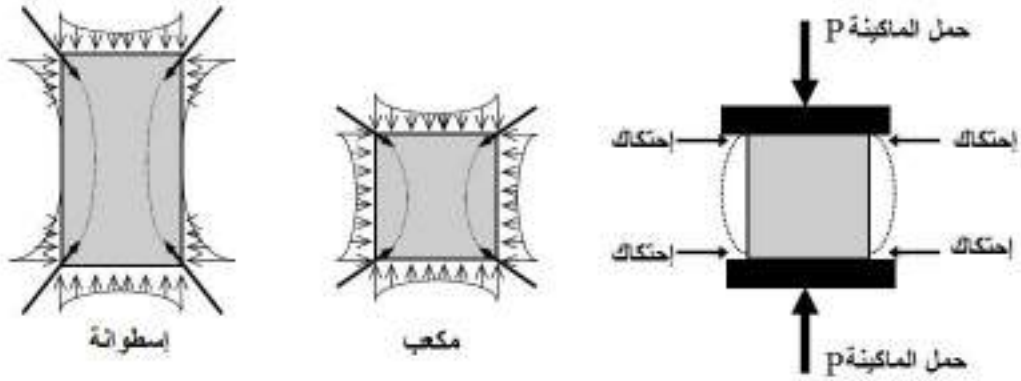
تتأثر المقاومة المقاسة لعينات اختبار الضغط بظروف التحميل المؤثرة عليها مثل طبيعة نهايات كل من عينة الاختبار وماكينة الضغط وكذلك الاحتكاك الناشئ بين سطحي العينة وماكينة الاختبار. وفيما يلي توضيح موجز لتأثير هذه الظروف على نتائج اختبار الضغط.

١- طبيعة نهايات العينة

فى بعض الأحيان يُغطى السطح السفلى والعلوي لعينة اختبار الضغط بواسطة وساند لمحاولة التغلب علي خشونة عدم استواء سطح التحميل وتختلف المقاومة المقاسة للعينات ذات الوساند عن تلك المقاسة للعينات العادية بدون وساند حيث وُجد أن العينات ذات الوساند تُظهر مقاومة أعلى من مقاومة العينات العادية القياسية وذلك لأن الوساند تعمل على توزيع الحمل بانتظام على كامل مقطع العينة المختبرة. ويعتمد اختلاف المقاومة المقاسة على نوع مادة الوسادة وعلى طريقة صبها فوق سطحي العينة. وتوصى بعض الدراسات باستعمال طبقة رقيقة من عجينة الأسمنت كوساند لأسطح تحميل عينات الضغط حيث أنه كلما كانت الوسادة رقيقة كانت نتائج الاختبار ممثلة للواقع. ويلاحظ أن استواء سطحي التحميل أو سطحي وسادتي التحميل يؤثر تأثيراً واضحاً على المقاومة المقاسة لعينة الاختبار حيث أن أي نسبة من الانحناء الناشئ فى هذين السطحين تسبب نقصاً كبيراً فى المقاومة الظاهرية للعينة.

٢- طبيعة أطراف ماكينة الاختبار

توضع عينات الضغط عند اختبارها بين فكي ماكينة الضغط اللذين يشكلان لوحي التحميل المعدنيين. ويجب أن تكون مساحة لوح التحميل المعدني مساوية على الأقل أو أكبر من مساحة سطح العينة المعرض للتحميل. ومن المعروف أنه كلما كانت العينة كبيرة أو ذات مقاومة عالية جداً فإنه يلزمها ألواح تحميل معدنية سميكة حتى لا تكون هذه الألواح مرنة بالنسبة للأحمال الكبيرة التى ستؤثر عليها مما قد يسبب تركيز الإجهادات على سطح العينة. أما إذا كانت عينة الاختبار صغيرة وألواح التحميل المعدنية سميكة نوعا ما فإنه يمكن اعتبار هذه الألواح جاسئة تماما بالنسبة للأحمال الصغيرة التى سوف تتعرض لها وبذلك تستطيع هذه الألواح أن تعطى أحمالاً موزعة بانتظام على سطح عينة الاختبار.



شكل (١٥) تأثير الإحتكاك بين العينة والماكينة.

٣- الاحتكاك بين سطحي العينة وماكينة إختبار الضغط

عند تحميل الأسطح الأفقية لعينة الإختبار تنضغط هذه العينة رأسيا أو تنكمش بسبب إجهادات الضغط الواقعة عليها بينما تحاول جوانب العينة أن تتمدد أفقيا إلا أن حركة التمدد الجانبى هذه سوف تقاوم بواسطة الإحتكاك الذى ينشأ فى هذه اللحظة بين لوحى التحميل المعدنين والسطحين الأفقيين لعينة الإختبار. وتتولد قوى الإحتكاك هذه بقيمة قصوى عند أطراف سطحى العينة وتقل قيمتها تدريجيا كلما إتجهنا إلى الداخل حتى تتلاشى تماماً كما هو موضح بالشكل (١٥) .ولقد وجد أن الإحتكاك الناشىء بين سطحى العينة وفكى ماكنة الإختبار يؤثر تاثيراً بالغاً على نتائج الإختبارات ويلعب دوراً كبيراً فى الإختلاف الملحوظ فى نتائج إختبارات العينات الخرسانية ذات الأشكال والمقاسات المختلفة ويرجع هذا إلى أن قوى الإحتكاك المتولدة تحاول أن تقاوم الإنفعال الجانبى للعينة وبذلك فهى - بطريقة غير مباشرة - تقاوم الإنفعال الرأسى الناتج عن التحميل وبذلك تكسب العينة مقاومة زائدة لأحمال الضغط مما يسبب تسجيل مقاومة أعلى للعينة على تدريج ماكنة الإختبار.

ويلاحظ أن تأثير قوى الإحتكاك المتولدة بين سطحى العينة وفكى الإختبار يظهر فى العينات المكعبة بوضوح بالمقارنة مع العينات المنشورية حيث أنه تنعدم إجهادات الإحاطة على جوانب المنشور فى المنطقة القريبة من منتصف الإرتفاع بينما لا تنعدم هذه الإجهادات على جوانب المكعب تقريباً مما يسبب تقوية زائدة للمكعب. وتشبه إجهادات الإحاطة فى حالة الإسطوانة مثيلتها فى حالة المنشور. وذلك يفسر ميل العينات المكعبة بصفة دائمة إلىإظهار مقاومة ضغط أعلى من المقاومة التى تظهرها عادة الإسطوانة أو المنشور. كذلك يزيد تأثير قوى الإحتكاك وإجهادات الإحاطة الناتجة عنها لنفس العينات المكعبة كلما صغر مقاس تلك العينة وبذلك تظهر العينات المكعبة صغيرة المقاس مقاومة أعلى من المقاومة التى تظهرها العينات المكعبة كبيرة المقاس.

٤- معدل التحميل

عند إختبار عينات الضغط لوحظ أنه كلما أسرعنا من معدل التحميل فإن هذه العينات تُظهر مقاومة أعلى للضغط. ولذلك فإنه ينبغي أن تحمل العينات الخرسانية المكعبة بحمل ضغط بحيث لاينتج عنه أى صدم على العينة ثم يزداد الحمل تدريجيا بمعدل ١٤٠ كغم/سم٢/دقيقة حتى لحظة تسجيل العينة لأقصى حمل على ماكنة الإختبار .ولقد أظهرت بعض الدراسات المعملية أن زيادة فترة التحميل بحيث تصل إلى عدة أيام تسبب نقصا كبيراً فى المقاومة المقاسة بالإضافة إلى أن الإنفعالات المقاسة للعينة تكون أكبر بكثير من المعتاد .ولما كانت الإنفعالات المقاسة على العينة تتأثر أيضا بمعدل التحميل حيث تقل كلما زاد معدل التحميل فإنه بناءاً على ذلك يزداد معاير المرونة المقاس للعينة الخرسانية كلما زاد معدل التحميل.

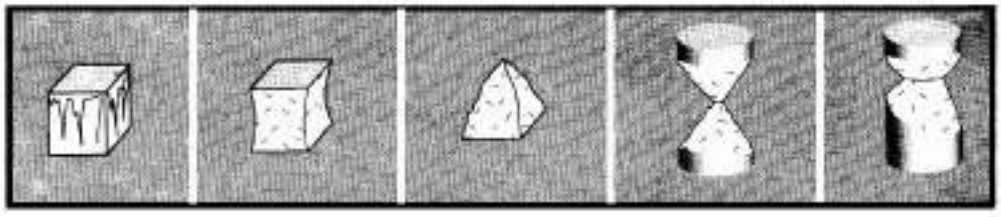
تاسعاً إتجاه التحميل

عند اختبار العينات المكعبة فإن تحميلها فى ماكينة الضغط يكون إما فى إتجاه الصب أو فى الإتجاه العمودى عليه ويؤثر إتجاه تحميل العينة بالنسبة لإتجاه الصب تأثيراً واضحاً على مقاومة العينة للضغط. ويُلاحظ أنه بالنسبة للعينات الإسطوانية أو المنشورية الشكل فإن إتجاه التحميل يكون دائماً فى إتجاه الصب بينما يكون إتجاه التحميل فى العينات المكعبة عمودياً على إتجاه الصب وذلك بفرض جعل الأسطح المصقولة للمكعب ملامسة لرأس ماكينة الإختبار. ولقد أظهرت بعض الأبحاث التى أجريت بهذا الشأن أن العينات التى تُختبر بحيث يكون إتجاه التحميل المؤثر عليها مطابقاً لإتجاه الصب تُظهر مقاومة أكبر بحوالى ٨% من المقاومة التى تُظهرها العينات التى تُختبر بإتجاه تحميل عمودى على إتجاه الصب. بينما أظهرت دراسات أخرى أن الخرسانة إذا كانت غنية بالأسمنت ومخلوطة ومدموكة جيداً فإن تأثير إتجاه التحميل على مقاومة الضغط المقاسة يتلاشى تقريباً خصوصاً إذا كان التحميل مؤثراً بحيث يعطى إجهادات موزعة بإنتظام على سطح العينة طوال فترة الإختبار.

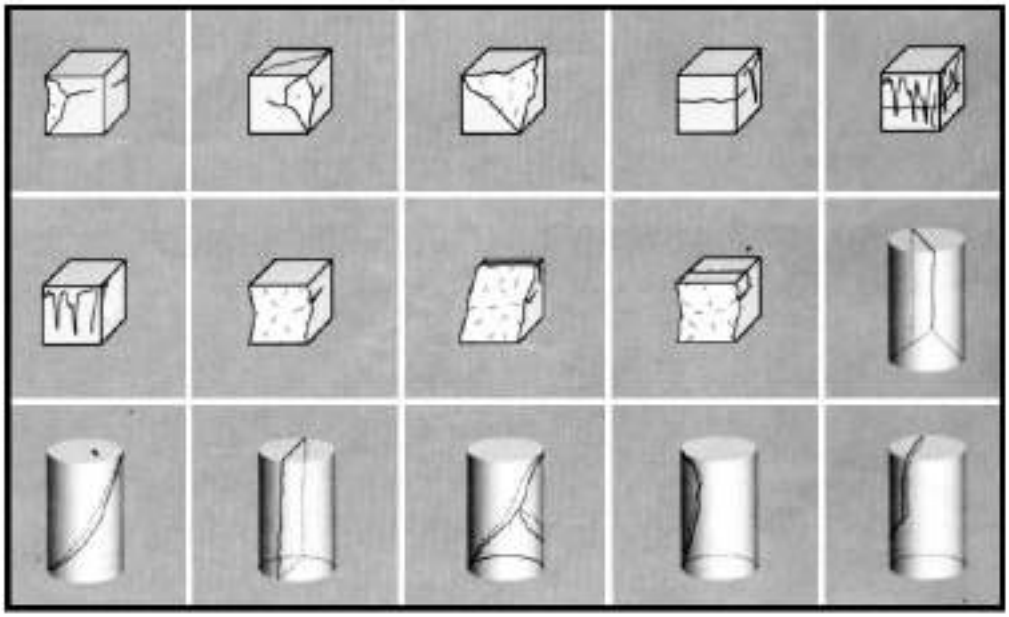
وقد يرجع سبب ضعف المقاومة للمكعبات القياسية التىتختبر فى إتجاه عمودى على إتجاه الصب إلى أن مركز ثقل المكعب الخرسانى فى هذه الحالة يكون مزحزحاً عن محور التحميل بسبب ميل هذا المركز لأن يكون قريباً من الطبقات الأفقية السفلى أثناء عملية الصب مما يسبب لا مركزية فى التحميل تضعف المقاومة المقاسة نظراً لتولد إجهادات الإنحناء.

١-٢ أشكال الانهيارات المحتملة للخرسانة تحت تأثير حمل الضغط

إن الانهيارات الحادثه فى العينات على إختلاف أشكالها نتيجة إختبارات الضغط نادراً ما تكون بسبب إجهادات الضغط فقط وإنما هي فى الغالب إنهيار قص أو إنهيارات شد ضلعي. هذا بالاضافة إلى أن الإنهيارات التى تحدث فى عينات الإختبار تختلف فى أشكالها كلياً عن الإنهيارات الممكن حدوثها فى الأعضاء الخرسانية فى المنشأ. ومن خلال الدراسات المعملية يمكن ملاحظة أن عينات إختبار الضغط القصيرة نسبيا مثل المكعبات والإسطوانات القياسية تتأثر بإجهادات الإحاطة الجانبية الواقعة عليها من إحتكاك نهايتها مع رأس الماكنه فتنهار على شكل مخروط ناقص كما هو موضح بالشكل (١٦). وهذا الشكل المخروطى ناتج عن تأثير إجهاد الضغط المحورى مضافاً عليه إجهادات الإحاطة الجانبية. بينما يلاحظ أنه لو حاولنا ملاشاة الإحتكاك الناسىء من نهايات العينة ورأس الماكنه بواسطة طبقة من الزيت تفصل بينها فإن إجهادات الإحاطة تقل وبالتالى تقل مركبة القوى الأفقية المؤثرة على العينة ويتحول شكل الإنهيار الحادث إلى شكل إنفلاق Splitting. وقد تحدث بعض الأخطاء أثناء التأثير بالحمل نتيجة عدم مركزية الحمل أو عدم إستواء أوجه العينة أو أى أسباب أخرى مما يؤدى إلى حدوث الإنهيار بشكل غير طبيعى أو غير صحيح كما فى الشكل (١٧) وغالباً تكون المقاومة الحقيقية لهذه العينات أكبر من القيمة التى تقرأها الماكنه بنسبة قد تصل إلى ٣٠% .



شكل (١٦) شكل انهيار صحيح لعينات إختبار فى الضغط.



شكل (١٧) شكل إنهيار غير صحيح لعينات اختبار فى الضغط.

١-٣ اختبار مقاومة الضغط Compressive Strength Test

يجرى إختبار تحديد مقاومة الضغط للخرسانة المتصلدة عادة بعد مرور ٢٨ يوماً على صب العينات وفى بعض الأحيان بعد ٧ أيام أو بعد فترة أخرى حسب الحاجة.

عينات الاختبار :

تكون عينة الإختبار بشكل مكعب طول ضلعه ١٥,٨ سم أى مساحة الوجه = ٢٥٠ سم٢ أو مكعب طول ضلعه ١٥ سم أو إسطوانة قطرها ١٥ سم وإرتفاعها ٣٠ سم.

طريقة إجراء الاختبار:

- توزن الكميات اللازمة من الأسمنت والركام الصغير والركام الكبير (أو المقاسات المحجوزة على المناخل منفصلة) والماء ويراعى عند حساب الوزن أن تزيد كمية الخرسانة المخلوطة عن الخرسانة اللازمة لملء القوالب بحوالى ١٥% وذلك لتعويض أى فقد أو هالك قد يحدث أثناء الإختبار.

- يُعد قالب الإختبار وتُغطى أوجه القالب الداخلية بطبقة رقيقة من الزيت الخفيف.
- تخلط مكونات الخرسانة إما ميكانيكياً أو يدوياً خلطاً جيداً حتى يصبح لونها متجانس.
- بمجرد الإنتهاء من الخلط تُجرى إختبارات القوام (الهبوط مثلاً) وأى إختبارات أخرى تكون مطلوبة مثل إختبارات القابلية للتشغيل (عامل الدمك أو فيبى) أو إختبار تحديد نسبة الهواء فى الخلطة.
- بعد إختبارات الخرسانة الطازجة يُملأ القالب مباشرة بالخرسانة على ٣ طبقات وتدك كل طبقة إما بمكنةالإهتزاز أو يدويا حتى تدمك الخرسانة دمكاً تاماً دون حدوث إنفصال حبيبى.
- تغطى القوالب بعد صبها مباشرة وتوضع فى مكان درجة حرارته ١٥ إلى ٢٠ درجة مئوية لفترة ٢٤ ساعة ويلاحظ أن لا تتعرض لأى إهتزازات.
- تُعلم العينات الخرسانية بعد ذلك ثم تفك من القوالب وتُغمر فى الحال فى ماء نقى درجة حرارته حوالى ١٥ ـ ٢٠ درجة مئوية وتُترك حتى وقت الإختبار ويُفضل ترك مسافات بين المكعبات وبعضها فى أحواض المعالجة كما يُنصح بعدم وضع المكعبات فوق بعضها.
- تختبر العينة بوضعها بماكنة الإختبار حيث يكون محورها منطبقاً مع محور رأس الماكنة وفى حالة العينة المكعبة يلزم أن يكون وجهى العينة الملامسين لسطحى رأس الماكنه هما الوجهين المقابلين للسطح الداخلى للقالب المعدنى لضمان استوائهما وتوازيهما. أما فى حالة العينة الإسطوانية فيلزم عمل مخدة Capping لسطح كل من نهايتي الإسطوانة بطريقة تجعل سطح النهايتين مستويين ومتوازيين. شكل (١٨) يبين وضع المكعب والإسطوانة فى ماكنة الضغط. ولكل إختبار تختبرثلاث عينات وتؤخذ القيمة المتوسطة للنتائج. أما الشكل (١٩) فيوضح شكل الكسر فى عينات خرسانية مكعبة بعد إجراء إختبار الضغط عليها.
- تعرض العينة لحمل ضغط محورى بمعدل حوالى ١٤٠ كغم/سم٢/دقيقة حتى الكسر وتدون النتائج فى جدول كما يلي:

رقم العينة	التاريخ	عمر الخرسانة	وزن العينة	أبعاد العينة	مساحة الوجه	حمل الكسر	مقاومة الضغط كغم/سم٢
١ ٢ ٣	تاريخ الصب تاريخ الكسر	٧ أيام					
٤ ٥ ٦	تاريخ الصب تاريخ الكسر	٢٨ يوم					

شكل (١٨)وضع للعينات المكعبة والاسطوانية فى ماكينة الضغط.

شكل (١٩)الكسر للعينات المكعبة فى إختبار مقاومة الضغط.

٢ مقاومة الشد Tensile Strength

٢-١ العلاقة بين مقاومتى الشد والضغط

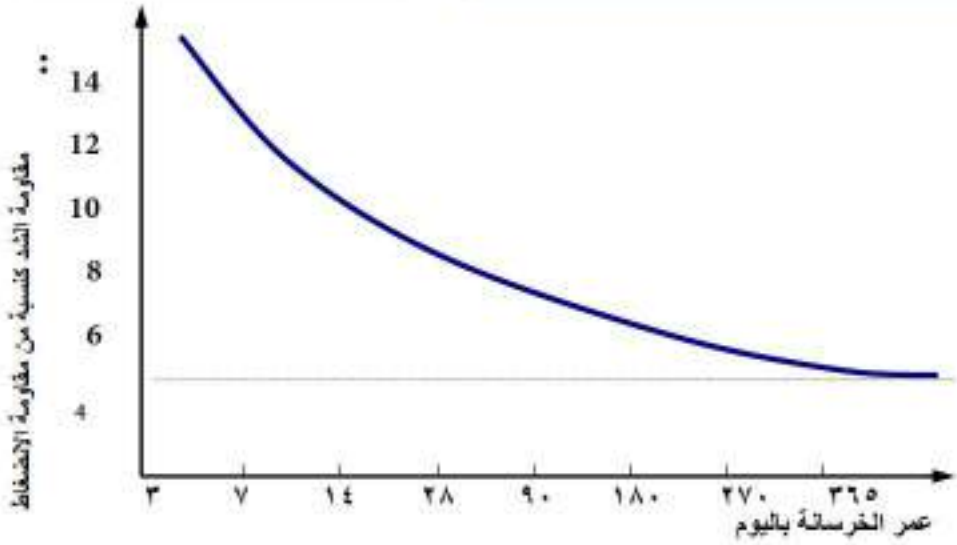
تتحمل الخرسانة العادية المتصلدة مقاومة الضغط بدرجة كبيرة ولذلك يجرى تصميم الخرسانة باعتبارها تقاوم إجهادات الضغط أساساً أما بالنسبة لمقاومتها لقوى الشد (سواء المباشر أو غير المباشر)فإنها تعتبر ضعيفة المقاومة للشد إذا ما قورنت بمقاومتها للضغط ويرجع هذا لكونها مادة قصفة ومع ذلك إهتم الباحثون بمقاومة الشد فى الخرسانة لأن حدوث معظم التشققات والشروخ فيها ناتج عن صغر مقاومتها للشد. ومقاومة الشد فى الخرسانة تتراوح ما بين ٧% إلى ١٤% من مقاومتها للضغط أى بنسبة متوسطة قدرها ١٠% وتختلف هذه النسبة تبعاً لعمر الخرسانة كما في الشكل (٢٠) وكذلك تعتمد هذه النسبة على رتبة الخرسانة كما في الشكل(٢١) ويلاحظ أنه كلما زادت مقاومة الخرسانة للضغط كلما قلت الزيادة النسبية لمقاومة الشد إلى أن تصل مقاومة الضغط إلى حوالى ٨٠٠ كغم/سم٢ عندها تصل مقاومة الشد إلى أقصى قيمة لها والتى تتراوح من ٦٠ إلى ٧٠ كغم/سم٢. ويمكن إستخدام المعادلتين التاليتين فى حساب مقاومة الشد للخرسانة:

١- للأعمار المبكرة

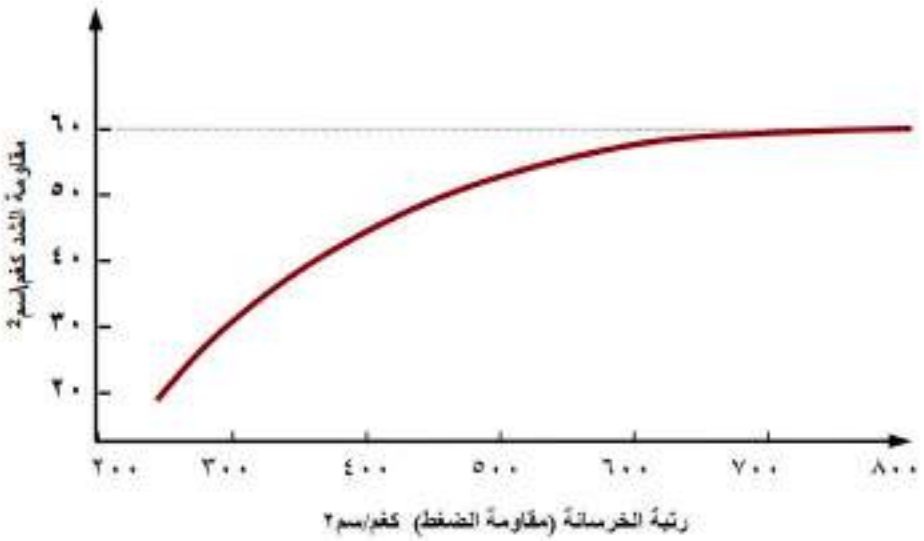
$$\frac{\text{مقاومة الشد}}{\text{مقاومة الضغط}} = \frac{١}{٨} : \frac{١}{١٢} = ١٠\%$$

٢- للأعمار المتأخرة

$$\frac{\text{مقاومة الشد}}{\text{مقاومة الضغط}} = \frac{١}{٢٠} = ٥\%$$



شكل (٢٠) اختلاف مقاومة الشد بإختلاف عمر الخرسانة



شكل (٢١) إختلاف مقاومة الشد بإختلاف رتبة الخرسانة.

٢-٢ طرق إختبار مقاومة الشد للخرسانة

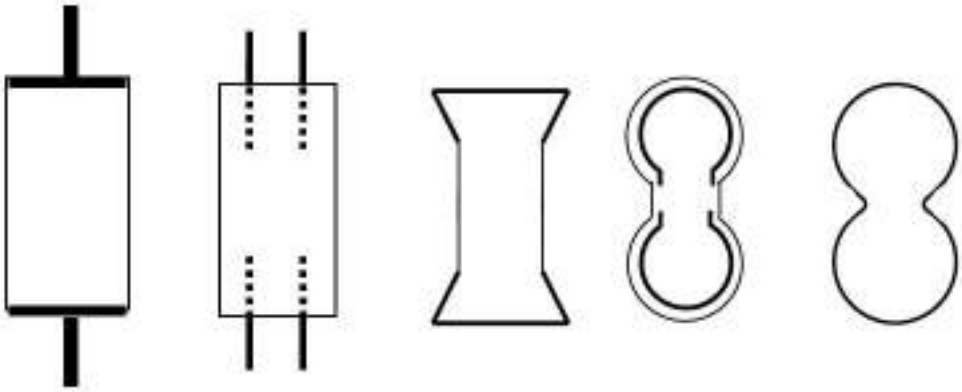
يمكن تعيين مقاومة الشد فى الخرسانة بعد ٧ أيام أو ٢٨ يوم أو أى مدة أخرى بطرق مباشرة وغير مباشرة كما يلى:

أولاً إختبار الشد المباشر Direct Tensile Strength

تطورت أشكال العينات الخرسانية فى إختبار الشد المباشر كما هو موضح فى (٢٢).

- تحضر العينات للإختبار بإجراء عمليات الخلط والصب والدمك والمعالجة بنفس الطريقة السابق ذكرها فى إختبار الضغط.
- يجرى الإختبار بمسك العينة عند نهايتيها بماكينة الإختبار والتأثير بحمل الشد تدريجيا وببطء ويعين الحمل المسبب لكسر العينة حيث تنكسر معظمها فى المنتصف وتحسب مقاومة الشد فى هذه الحالة بقسمة الحمل الأقصى على مساحة مقطع العينة.

$$\text{مقاومة الشد المباشر} = \frac{\text{الحمل الأقصى}}{\text{مساحة المقطع}} = \frac{P_{max}}{A} \quad \text{كغم/سم}^2$$



شكل(٢٢) أشكال العينات الخرسانية فى إختبار الشد المباشر.

ونظراً لصعوبة إجراء إختبار الشد المباشر نتيجة الصعوبة النسبية فى صب و فك عينة الإختبار ونظراً لوجود إجهادات ضغط مركزة بين كلابات التثبيت وعينة الإختبار وكذلك إحتمال عدم مركزية حمل الشد فإنه يتم اللجوء إلى طرق غير مباشرة لقياس مقاومة الشد.

ثانياً إختبار الشد غير المباشر (الطريقة البرازيلية) Indirect Tensile Strength

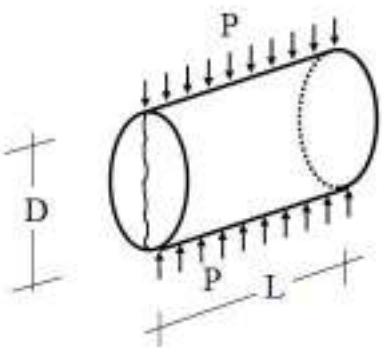
عينة الاختبار القياسية عبارة عن إسطوانة خرسانية قطرها ١٥ سم وطولها ٣٠ سم حيث توضع هذه الإسطوانة بين رأسى ماكينة الإختبار فى وضع أفقى وعلى جانبيها بين شريحتين من الخشب الأبلكاج أو المطاط بعرض ٢ سم ويعين حمل الضغط المسبب لكسر العينة وعند إنهيارها يسجل الحمل الأقصى.

$$\text{مقاومة الشد غير المباشر (البرازيلي)} = \frac{\text{٢} \times \text{الحمل الأقصى}}{\text{ط} \times \text{الطول} \times \text{القطر}} \quad \text{كغم/سم}^{\text{٢}}$$

$$\text{مقاومة الشد} = \frac{P\ 2}{\pi DL} \quad \text{كغم/سم}^{\text{٢}}$$

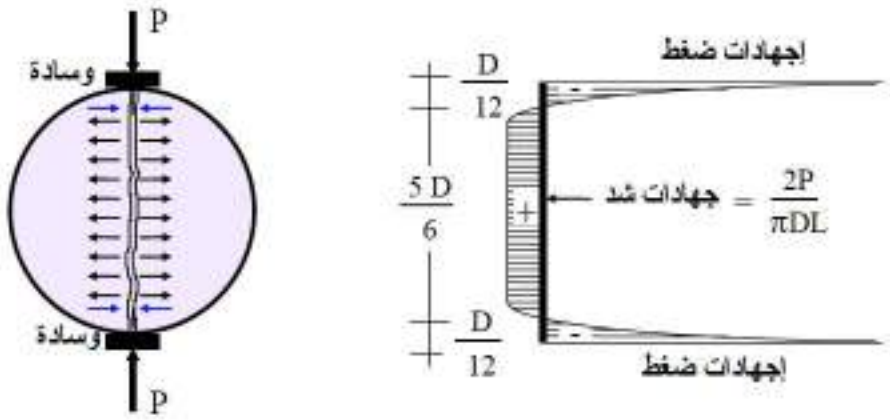
حيث:

P – الحمل الأقصى .....كغم
D = قطر الإسطوانة ..... سم
L – طول الإسطوانة ..... سم



شكل (٢٣) اسطوانة الشد.

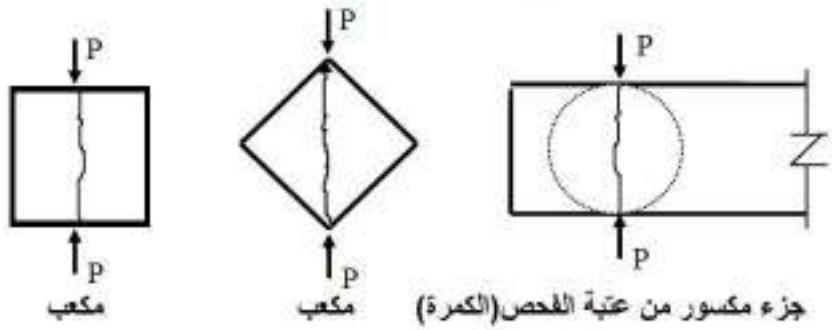
ويكون المستوى الرأسى للإنهيار هو مستوى إجهادات الشد الرئيسية حيث تكون موزعة على ٨٠% من طوله وفى نفس الوقت توجد إجهادات ضغط تتراوح قيمتها من ١٦ إلى ١٨ مرة قدر إجهادات الشد وذلك فى المنطقتين تحت تأثير الحمل مباشرة (فى طرفى مستوى الإنهيار). ويتميز إختبار الشد غير المباشر بسهولة الإجراء وكذلك لوجود إجهادات الشد بقيمة ثابتة و منتظمة على حوالى ٦٠% من طول مستوى الإنهيار كما في الشكل (٢٤). وعموماً تؤخذ مقاومة الشد للخرسانة مساوية لـ ٨٥% من قيمة مقاومة الشد البرازيلي.



شكل (٢٤) توزيع الإجهادات فى عينة الشد البرازيلى.

ويمكن إجراء الإختبار على عينات بشكل منشور أو مكعب أو جزء من كمرة كما في الشكل (٢٥). وفى هذه الحالة يجب تصحيح قيمة المقاومة بضربها فى عامل k يتوقف على تغير أبعاد العينة ويعين معمليا.

مقاومة الشد البرازيلي = $\frac{P\ 2}{\pi DL}$ k كغم /سم^2 .



شكل (٢٥) إمكانية إجراء إختبار الشد البرازيلى على عينات مختلفة.

وعموماً فإن الكود التصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية قد أعطى بعض القيم الإسترشادية جدول(٥) للعلاقة بين مقاومة الشد فى الأعمار المختلفة ومقاومة الشد بعد ٢٨ يوم وذلك فى حالة الخرسانة المصنوعة فى الظروف العادية والغير محتوية على إضافات.

جدول (٥) قيم إسترشادية لنسبة مقاومة الشد فى أعمار مختلفة.

عمر الخرسانة (يوم)	٣	٧	٢٨	٩٠	٣٦٥
أسمنت بورتلاندى عادى	٠,٥	٠,٧١	١	١,٠٥	١,٠٥
أسمنت بورتلاندى سريع التصلد	٣/٢	٦/٥	١	١,٠٥	١,٠٥

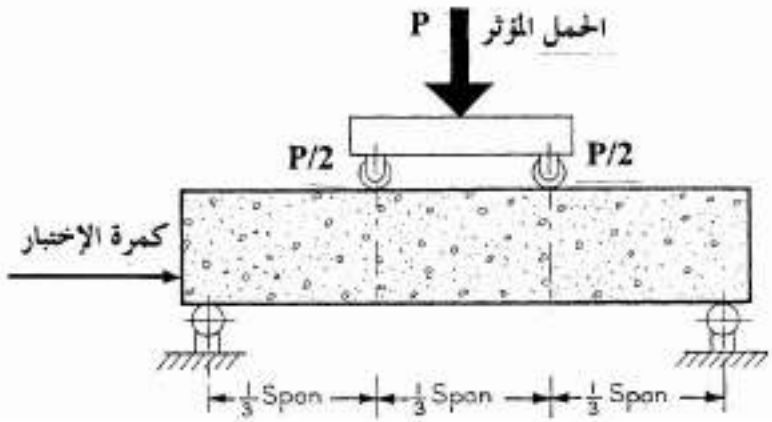
٣ - مقاومـة الانثناء Bending Strength

عندما تتعرض كمرة خرسانية للإنحناء فإنه يمكن حساب مقاومة الإنحناء (التى تعتبر أيضا مقياساً لمقاومة الشد غير المباشر) وتسمى معاير الكسر فى الإنحناء Modulus of Rupture وتتراوح قيم إجهادات معاير الكسر فى الإنحناء بين ١٢% - ٢٠% من مقاومة الضغط. وبالتالى فإن مقاومة الإنحناء تزيد عن مقاومة الشد للخرسانة بنسبة من ٦٠ إلى ١٠٠%. وعموماً تؤخذ مقاومة الشد للخرسانة مساوية لـ ٦٠% من قيمة مقاومة الإنحناء. ومن ذلك يتضح أن مقاومة الإنحناء تزيد عن مقاومة الشد البرازيلى بحوالى ٤٠%. ويجرى إختبار الإنحناء لتعيين مقاومة الخرسانة المتصلدة للإنحناء ودراسة سلوك الكمرات الخرسانية عند تعرضها لأحمال إنحناء وكذلك شكل الكسر الناتج عن إنهيار هذه الكمرات.

طريقة إجراء الإختبار :

توضع الخرسانة فى قوالب على شكل كمرات أبعادها الداخلية ١٥×١٥×٧٠سم أو ١٠×١٠×٥٠ سم وذلك للركام الذى لا يزيد مقاسه الإعتبارى الأكبر عن ٢٠ مم. تخلط الخرسانة وتملأ القوالب وتدمك وتعالج بنفس الطريقة المتبعة فى الضغط ويعمل من نفس الخلطة الخرسانية عينات ضغط لإعطاء فكرة عن العلاقة بين الضغط والإنحناء.

توضع الكمرة فى ماكنة الإختبار على ركيزتين كما هو مبين في الشكل (٢٨) ويراعى أن يكون كل من قضيب الإرتكاز والتحميل بطول أكبر من عرض الكمرة كما يكون التحميل تدريجيا وبمعدل منتظم يؤدى إلى الوصول بالقيمة النهائية للحمل فى مدة حوالى ٥ دقائق.



شكل (٢٦) شكل الكمرة فى إختبار الانحناء.

ويفضل إجراء اختبار الانحناء للخرسانة بتحميل عينة الإختبار فى نقطتين Two-Point Loading لأن ذلك يجعل جزء الكمرة الذى يحدث بداخله الكسر معرض إلى عزم خالص Pure Bending دون تواجد قص فى ذلك الجزء الأمر الذى يجعل الكسر نتيجة مقاومة الإنحناء فقط وتعبر نتائج الإختبار عن مدى تأثر الخرسانة بالإنحناء. ويمكن فى بعض الأحيان -عند الضرورة- عمل إختبار الإنحناء بالتحميل فى نقطة واحدة وهى منتصف الكمرة المختبرة ولايعطى ذلك الإختبار إنحناء خالص بل إنحناء مصحوب بتأثير القص ويكون معاير الكسر له أقل من معاير الكسر فى حالة التحميل فى نقطتين.

يدون حمل الكسر P_{max} وتحسب مقاومة الإنحناء (معاير الكسر) من المعادلة:

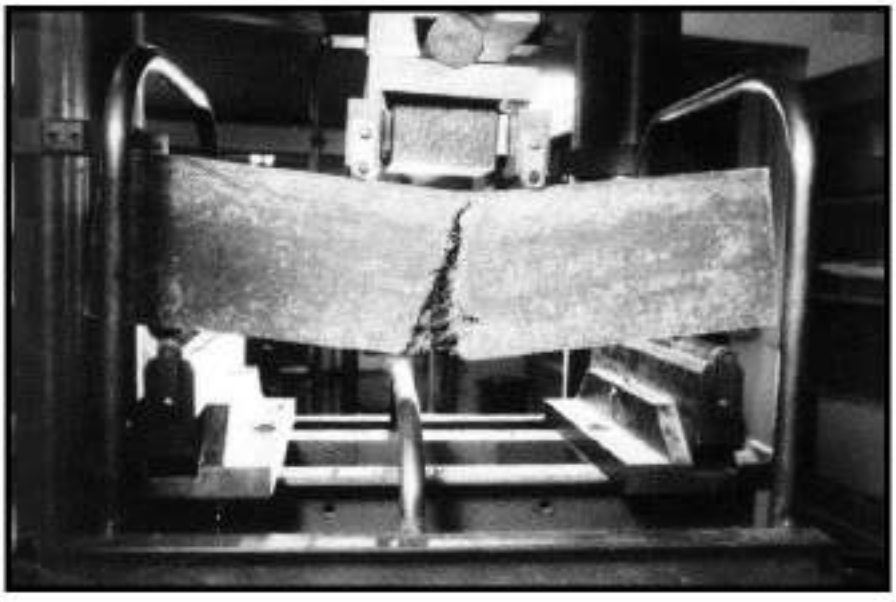
$$f_b = \frac{M_{max} \cdot Y}{I}$$

M_{max} – Maximum bending moment – P_{max} L / 6 (حالة حملين مركزين)

Y – h/2 ,

I – Moment of inertia – $bh^3/12$

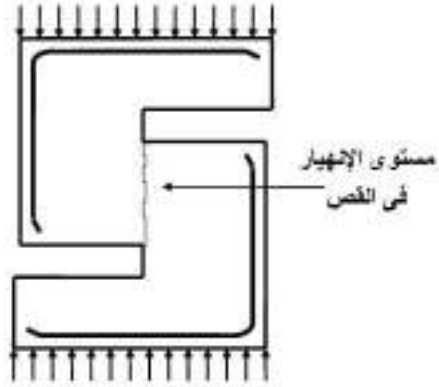
ويبين الشكل (٢٨) الكسر فى عتبة او كمرة خرسانية معرضة لحملين مركزين.



شكل (٢٧) شكل الكسر لكمرة فى إختبار الانحناء.

٤-مقاومـة القص Shear Strength

لا يمكن تعيين مقاومة القص فى حالة الخرسانة بقيمة صحيحة تماماً نظراً لأن قوى القص المباشرة) قوتين متساويتين ومتوازيتين تؤثران على مستويين على مسافة صغيرة جداً من بعضهما(تكون دائما مصحوبة بعزم إنحناء أي باجهادات شد وضغط لذلك فمن النادر إجراء إختبار مقاومة القص المباشر للخرسانة وخصوصاً أنه فى إستعمالات الخرسانة نادراً ما تتعرض للقص الخالص وإنما تتعرض للقص المصحوب بانحناء ويمكن إجراء إختبار تحديد مقاومة القص المباشر للخرسانة كما هو مبين في الشكل (٢٨) وهو إختبار غير دقيق النتائج. ويكون تعريض عينات الخرسانة لتأثير القص الخالص أحياناً باجراء إختبار الإلتواء Torsion على عينة خرسانية غالباً ما تكون إسطوانية وذلك لأن الإلتواء يعطي إجهادات قص خالصة. ولكن هذا الإختبار من الصعب إجراؤه بدقة كما أن كسر العنصر الخرساني يكون غالباً نتيجة تأثير الشد القطرى Diagonal Tensionوليس بتأثير القص نظراً لأن الخرسانة ضعيفة فى الشد عنها فى القص . ولقد وجد أن مقاومة القص فى الخرسانة أكبر من مقاومتها للشد بحوالى ٢٠ إلى ٣٠% أى أنها حوالى ١٠ إلى١٢ % من مقاومة الضغط. أما إذا أجرى إختبار الإنحناء لبيان تأثير القص المصاحب لعزم الإنحناء وذلك بتقوية الكمرة او العتبة المختبرة من جهة الشد بحديد تسليح لمنع الإنهيار بالشد الناتج من الإنحناء فإن القص المصاحب لعزم الإنحناء يضهر تأثيره بكسر العينة بواسطة إجهادات الشد القطرى الناتج من القص وليس بتاثير القص المباشر كما فى الشكل (٢٩). يتبين مما تقدم أن مقاومة الخرسانة للشد القطرى تعبر عن مدى مقاومة الخرسانة للقص لذلك لا يجرى إختبار القص للخرسانة إكتفاء بتعيين مقاومة الشد لها



شكل (٢٨) شكل عينة إختبار خرسانية فى القص.

شكل (٢٩) انهيار قص (شد قطرى) فى كمرة او عتبة من الخرسانة المسلحة بدون اتاري.

٥ ـ مقاومة التماسك Bond Strength

مقاومة التماسك هي مقاومة الخرسانة لإنزلاق سيخ او شيش التسليح الملتصق بها والموجود بداخلها ويعتبر تماسك أسياخ او شيش الحديد مع الخرسانة هو أساس فكرة التصميم الإنشائى للأعضاء الإنشائية من الخرسانة المسلحة ويتم هذا التماسك بواسطة:

- الإلتصاق مع الخرسانة Adhesion
- قوى الإحتكاك بين الشيش والخرسانة Friction
- التحميل على النتوءات البارزة فى الشيش Bearing

وتعتمد مقاومة التماسك على كل من خواص الخرسانة وخواص الحديد وكذلك على مساحة التلامس بينهما. ومن البديهي أن تكون مقاومة التماسك أكبر فى حالة الأسياخ ذات النتوءات عنها فى حالة الأسياخ الملساء (شكل ٣٠). وتتراوح مقاومة التماسك من ٢٥ إلى ٤٥ كغم/سم^2 وذلك فى حالة الخرسانة ذات المقاومة العادية (٢٥٠ كغم/سم^2) أما فى حالة الخرسانة عالية المقاومة فإن مقاومة التماسك قد تصل إلى ٨٠ كغم/سم^2 أو أكثر. ويجرى إختبار تعيين مقاومة التماسك بين الخرسانة وحديد التسليح وذلك بتحديد الحمل المسبب لإنهيار وإنزلاق سيخ حديد التسليح داخل الخرسانة. وتوجد إختبارات عديدة لتعيين مقاومة التماسك تختلف عن بعضها فى كيفية تحميل سيخ او شيش حديد التسليح. وفيما يلي عرض سريع لبعض هذه الإختبارات.

شكل (٣٠) مقاومة التماسك بين الحديد والخرسانة.

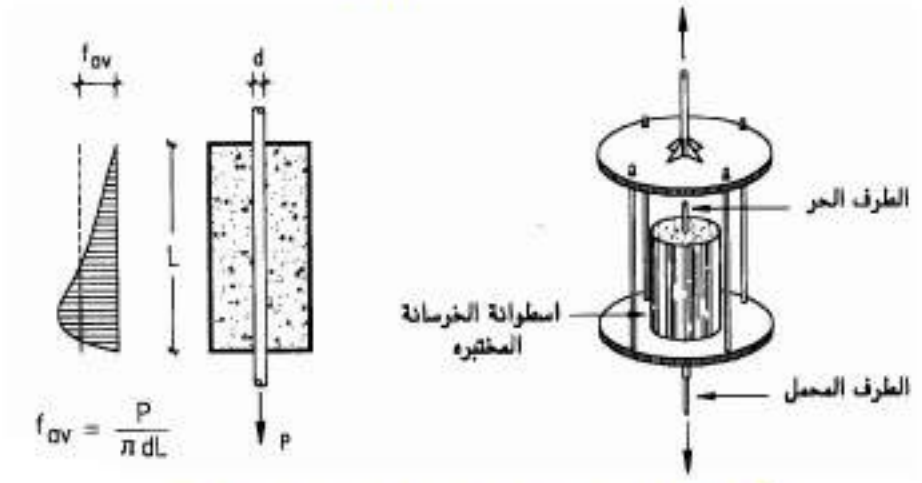
أ - اختبار الاقتلاع (الشد) Pull Out Test

- تُصب عينة الإختبار من الخرسانة على هيئة إسطوانة أو منشور على أن يكون فى محورها سيخ حديد تسليح بالقطر المعين المراد إختبار تماسكه.
- يُجرى معالجة العينة للمدة المناسبة المطلوبة وغالباً تكون ٢٨ يوما.
- تُوضع العينة بماكنة الإختبار بالطريقة التى تجعل الشيش او السيخ معرضا للشد من أحد طرفيه فقط وذلك لإقتلاعه من الخرسانة كما هو موضح بالشكل (٣١) وعلى ذلك يكون لشيش الحديد طرف محمل وطرف آخر حر.
- يُركب جهاز قياس التشكل على سيخ التسليح من ناحية الطرف المحمل أو الطرف الحر أو من الناحيتين معاً وذلك لقياس الحركة النسبية بين الحديد والخرسانة.
- يُشد سيخ حديد التسليح من الطرف المحمل تدريجيا فيحدث إنزلاق Slip للطرف المحمل ويتبين ذلك بحركة نسبية بينه وبين الخرسانة يبينها جهاز قياس التشكل وتسجل قراءات الحمل والإنزلاق للطرف الآخر المحمل.
- تلاحظ قراءات جهاز قياس التشكل عند الطرف الحر حيث لا يبين الجهاز أى قراءة إلا عند تمام إنهيار تماسك السيخ مع الخرسانة وعندما يبدأ مؤشر الطرف الحر فى التحرك أى عندما يحدث أول إنزلاق للطرف الحر Initial Slip يسجل الحمل المسبب لذلك.
- تحدد من قراءات الحمل والإنزلاق للطرف المحمل قيمة الحمل المسبب لإنزلاق قيمته ٠,٢٥ مم.
- يعتبر التماسك بين الحديد والخرسانة فى حالة إنهيار فى إحدى الحالتين:

إما حدوث أول إنزلاق للطرف الحر أو حدوث إنزلاق قيمته ٠,٢٥ مم للطرف المحمل.

وعلى ذلك تحسب مقاومة التماسك أنها الحمل المسبب للإنزلاق مقسوماً على مساحة السيخ المتماسكة مع الخرسانة أى:

$$\text{مقاومة التماسك} = \frac{P}{\pi\, d\, L} \quad \text{كغم/سم}^2.$$



شكل (٣١) قياس مقاومة التماسك بين الخرسانة وحديد التسليح.

ب- إختبار الدفع (الضغط) Push Out Test

يجرى الإختبار بنفس الطريقة السابقة لإختبار الإقتلاع لكن يكون تحميل حديد التسليح بالضغط بدلاً من الشد كما في الشكل (٣٢). ولهذا الإختبار ميزة سهولة الإجراء إلا أنه يعطي مقاومة عالية للتماسك نظراً لأن كلا من الحديد والخرسانة في حالة ضغط.

ج- إختبار السيخ المدفون Embedded Rod Test

يجرى الاختبار بتعريض السيخ المدفون في عينة الإختبار والبارز من كل من نهايتيها إلى حمل الشد من كل من طرفية ثم قياس الحركة النسبية بين حديد التسليح والخرسانة عند كل من نهايتي العينة باستخدام جهاز قياس التشكل (شكل ٣٣). ويعتبر الحمل المسبب لإنهيار التماسك هو الحمل الذى يحدث تغيير مفاجئ في قيمة الحركة النسبية بين حديد التسليح والخرسانة. وتحسب مقاومة التماسك من المعادلة المذكورة سابقا وهذا الإختبار وإن كان يمثل الحالة الواقعية الفعلية لحديد التسليح داخل الخرسانة إلا أن من عيوبه صعوبة إمكان مقارنة نتائجه.

د- إختبار الإلتواء للسيخ Torsion Test

يجرى هذا الاختبار بتعريض سيخ حديد التسليح الموجود في محور العينة المختبرة إلى عزم إلتواء(M_t) بعد تثبيت العينة في مكنة الإختبار وزيادة التحميل (شكل ٣٤). وتسجل قيمة زاوية الإلتواء المصاحبة لكل عزم إلتواء لحديد التسليح بالنسبة للخرسانة الموجودة عند الطرف المحمل والطرف الحر لحديد التسليح ثم يبين عزم الإلتواء الذى يحدث عنده الإنزلاق ثم تحسب مقاومة التماسك من المعادلة:

$$\text{مقاومة التماسك} = \frac{2\,M_t}{\pi\,d^2\,L}$$

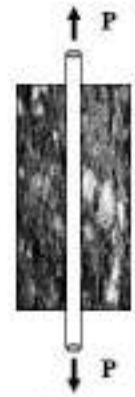
حيث d – قطر السيخ

M_t – عزم الالتواء عند الإنزلاق

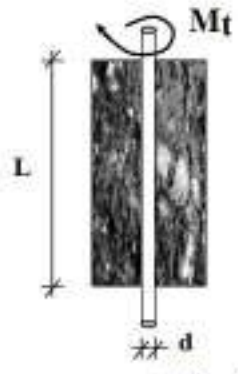
L – الطول المدفون من السيخ في الخرسانة.

وهذا الاختبار محدود جداً ونادر إجرائه.

شكل (٣٢) الدفع



شكل (٣٣) السيخ المدفون



شكل (٣٤) الإلتواء.

هـ- اختبار الكمرة Beam Test

يجرى هذا الاختبار بتحميل كمرة خرسانية بها أسياخ تسليح فى ناحية الشد بحمل فى منتصفها أو بحمل فى نقطتين وزيادة التحميل تدريجيا كما فى شكل (٨-٣٥) فيحدث ذلك إنهيار التماسك فى المنتصف عند حمل معين ويزحف ذلك الإنهيار على طول السيخ على جانبية حتى طرفيه بإزدياد التحميل وتقاس الحركة النسبية بين حديد التسليح والخرسانة عند أى مقطع من مقاطع الكمرة ثم تحسب مقاومة التماسك عند أى مقطع على أساس الحمل المسبب لحدوث أول إنزلاق Slip بين الخرسانة وحديد التسليح عند هذا المقطع وذلك من المعادلة :

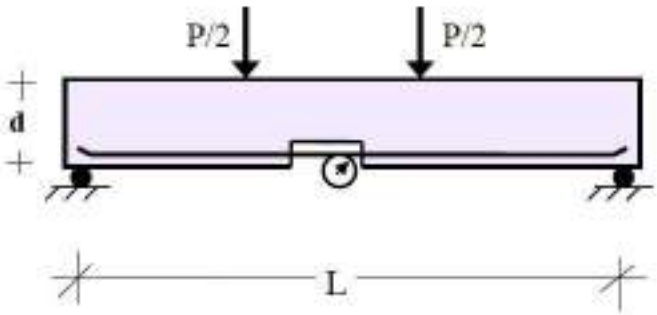
$$\text{مقاومة التماسك} = \frac{V}{Y_{ct} \sum \phi}$$

حيث V = قوة القص عند المقطع المستعرض

Y_{ct} = العمق الفعال للكمرة = $0.87\ d$

$\sum \phi$ = مجموع محيط أسياخ حديد التسليح

وهذا الإختبار يمثل تماماً حالة التماسك بين حديد التسليح والخرسانة ويمكن إستخدام نتائجه مباشرة فى التصميم إلا أنه أكثر تكلفة علاوة على صعوبة إجرائه. ويراعى تعرية الجزء الأوسط من أسفل للكمرة حتى يمكن قياس الإنزلاق بين الحديد والخرسانة.



شكل (٣٥) إختبار الكمرة لتعيين مقاومة التماسك بين الحديد والخرسانة.

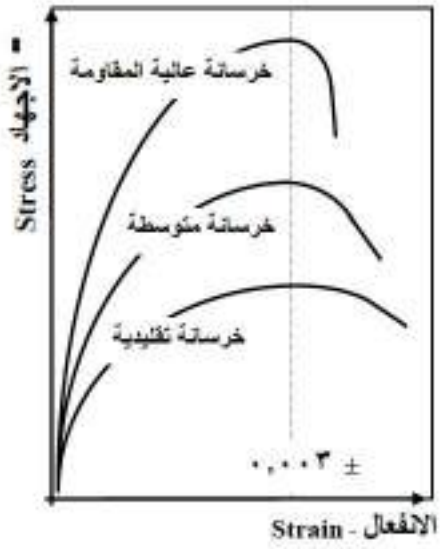
٦- معيار ا لمرونة Modulus of Elasticity

٦-١ تعريف

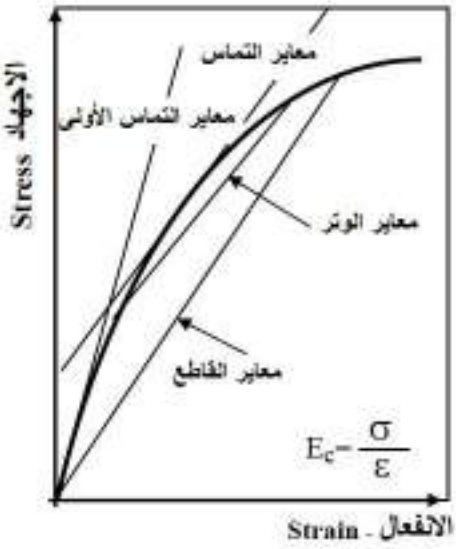
معيار المرونة هو التغير فى الإجهاد بالنسبة إلى التغير فى الإنفعال المرن. وهو يعبر عن صلابة المادة أى مقاومتها للتشكل.

و معاير المرونة دالة فى مقاومة الخرسانة للضغط (f_c) $E_c = \varphi$ ونظراً لأن الخرسانة المتصلدة مادة ليست مرنه تماماً Elasto-plastic فإن العلاقة بين الإجهاد والإنفعال تكون غالباً منحنى ويقل هذا الإنحناء كلما أرتفعت رتبة الخرسانة أنظر شكل (٣٦) . ويمكن التعبير عن معاير المرونة بأحد الصور الأربعة الآتية والتى يوضحها الشكل (٣٧).

١- معاير التماس الأولى Initial Tangent Modulus
٢- معاير التمـــاس Tangent Modulus
٣- معاير القـاطـع Secant Modulus
٤- معاير الـوتـــر Chord Modulus



شكل (٣٦)العلاقة بين الإجهاد والانفعال.



شكل (٣٧) الصور المختلفة لمعاير المرونة.

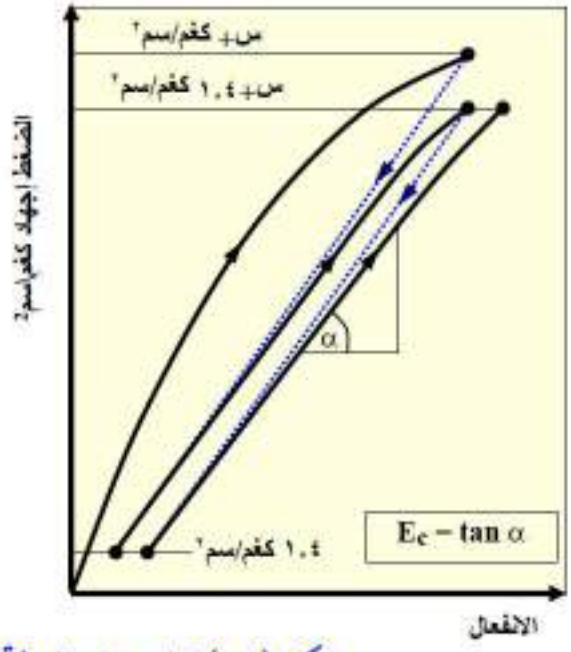
٢-٦ اختبار معاير المرونة فى الضغط Modulus of Elasticity Test

يهدف هذا الإختبار لتعيين معاير المرونة للخرسانة لفائدة ذلك فى معرفة صلابة Stiffness الخرسانة وكذلك لمعرفة قيمة معاير المرونة فى حساب تشكل المنشآت الخرسانية Deformation كما يفيد فى تعيين نسبة معاير مرونة الحديد إلى الخرسانة لأهميتها فى التصميم $n = E_s / E_c$. وفيما يلي شرح لكيفية تعيين معاير المرونة للخرسانة وذلك طبقا لما جاء بالمواصفات الإنجليزية B.S.S. 1881

❐ طريقة التحميل الإستاتيكى

- تُعمل خلطة خرسانية وفقاً للبيانات المطلوبة وتصب وتدمك هذه الخلطة فى قوالب إما على شكل إسطوانات بقطر ١٥ سم وإرتفاع ٣٠ سم أو منشورات بحيث تكون النسبة بين الإرتفاع إلى العرض لا تقل عن ٢ وتصب من نفس الخلطة عينات للضغط بعد ٢٨ يوما.

- بعد المعالجة لمدة ٢٨ يوماً أو المدة المحددة يثبت مقياسين للإنفعال على سطح العينة وفى مقابل بعضها وموازيين لمحور عينة الإختبار كما في الشكل(٣٨). تحمل العينة بماكنة الإختبار بمعدل ١٤٠كغم/سم٢/دقيقة حتى يصل الإجهاد إلى (س + ٧) كغم/سم٢ حيث س = ثلث متوسط مقاومة الضغط.



شكل (٣٨) قياس معاير المرونة للخرسانة.

- يستمر التحميل بهذا الإجهاد لمدة دقيقة على الأقل ثم يقلل تدريجيا إلى ١,٤ كغم/سم^{٢} ثم تؤخذ قراءات مقياس الإنفعال ثم يعاد التحميل ثانياً وبنفس المعدل إلى أن يصل الإجهاد إلى (١,٤ +س) كغم/سم^{٢} ويستمر التحميل عند هذه القيمة لحين أخذ قراءات الإنفعال ثم يقلل التحميل ثانياً وتدريجيا وتؤخذ القراءات ثانياً عند ١,٤ كغم/سم^{٢}.

- يعاد التحميل مرة ثالثة وتؤخذ ١٠ قراءات لمقياس الإنفعال عند ١٠ زيادات للإجهاد تكون متساوية تقريباً إلى أن يصل الإجهاد إلى (١,٤ + س) كغم/سم^{٢}. يتم مقارنة قيم الإنفعال الكلى الحادث فى حالتى التحميل الثانية والثالثة فإذا كان هناك إختلاف أكثر من ٥% يتم عمل دورة تحميل رابعة وهكذا حتى يصل الفرق بين دورتى تحميل متتاليتين إلى ٥% أو أقل وبذلك يمكن تحديد العلاقة بين الإجهاد والإنفعال الناتج عنه من حالة التحميل الأخيرة ويتم قياس معاير المرونة كما فى الشكل.

- تدون النتائج فى جدول يوضح الزيادة فىالحمل ومقدار التشكل المناظر ثم تحسب قيم الإجهادات والإنفعالات المناظرة ومنها يمكن رسم بيانى يوضح العلاقة بين الإجهاد والإنفعال للخرسانة ثم يعين معاير المرونة للخرسانة والذى يساوى ميل هذا الخط البيانى.

الحمل	قراءة أجهزة قياس الإنفعال			الإجهاد	الإنفعال
كغم	الجهاز الأيمن	الجهاز الأيسر	المتوسط	كغم/سم^{٢}	ملم/ملم

❑ تعيين معاير المرونة بالطريقة الديناميكية

يمكن تحديد معاير المرونة ديناميكياً وذلك بتعريض عينة الخرسانة إلى إهتزازات ترددية وتحديد عدد الدورات فى الثانية الذى يحدث عندما تكون إهتزازات الخرسانة فى حالة رنين ثم حساب معاير المرونة من معادلة معينة ترفق مع جهاز الإختبار.

٣-٦ تعيين معاير المرونة فى الإنحناء

وقد يقاس معاير المرونة للخرسانة من إختبار الإنحناءللعتبةاو الكمرى (شكل ٣٩) وذلك بتعريضعتبة خرسانية لحمل مركز فى منتصفها وقياس الترخيم الحادث ثم حساب قيمة معاير المرونة كما يلي:

$$E_c = \frac{PL^3}{48\Delta I}$$

حيث:

- **P** هو الحمل فى منتصف الكمرة
- **L** هو فضاء الكمرة او العتبة
- **I** هو عزم القصور الذاتى للمقطع المستعرض
- Δ هو الترخيم عند منتصف الكمرة **Deflection**

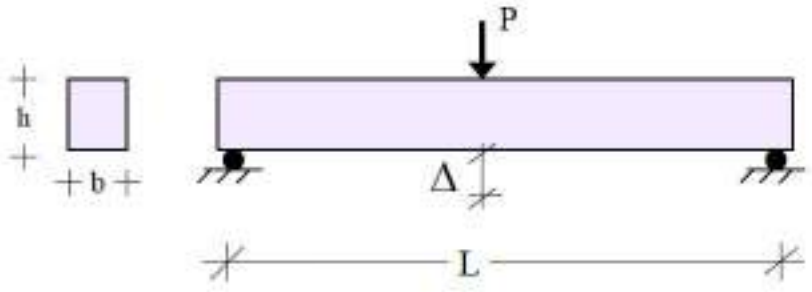
ونظراً لأن النسبة بين الإرتفاع و البحر للكمرة المستخدمة فى هذا الإختبار $(\frac{h}{L})$ تكون كبيرة

نسبياً فيفضل أخذ قيمة الترخيم الناتجة عن تأثير قوى القص فى الإعتبار. وعليه يمكن حساب معاير المرونة من المعادلة الآتية:

$$E_c = \frac{PL^3}{48\Delta I}\left[1+(2.4+1.5\nu)\left(\frac{h}{L}\right)^2-0.84\left(\frac{h}{L}\right)^3\right]$$

حيث:

- **h** هو إرتفاع (عمق) الكمرة
- ν نسبة بواسون (الإنفعال العرضى / الإنفعال الطولى) وهى تتراوح من ٠,١٥ إلى ٠,٢ للخرسانة.



شكل (٣٩)قياس معاير المرونة من إختبار الإنحناء.

٦-٤ العوامل التى تؤثر على قيمة معاير المرونة

تؤثر العوامل المختلفة المؤثرة على مقاومة الضغط غالبا على معاير المرونة بنفس الطريقة تقريبا إلا أنه بمعدل أقل. وأهم هذه العوامل هى كمية الأسمنت ـ نسبة م/س ـ العمر ـ نوع وتدرج الركام ـ حالة المعالجة ـ درجة الرطوبة عند الإختبار ـ معدل التحميل. وهناك عاملان هامان يؤثران على قيمة معاير المرونة وهما:

- ❐ معاير مرونة الركام المستخدم.
- ❐ كثافة الخرسانة .

٦-٥ بعض العلاقات لتعيين معاير المرونة

$$E_c = 0.136\,\gamma^{1.5}\sqrt{f_{cu}} \quad \text{.....} \quad (١)$$

حيث γ كثافة الخرسانة طن/م^3 و E_c , f_{cu} تقاس ب كغم /سم^2.

المعادلة رقم (1) هي معادلة معهد أبحاث الخرسانة الإمريكي ACI وتأخذ كثافة الخرسانة فى الإعتبار وهي قابلة للتطبيق للخرسانة ذات الكثافة من ١٥٠٠ إلى ٢٥٠٠ كغم/م^3

ويعرف معاير المرونة فيها بأنه ميل الخط الواصل من إجهاد قيمته صفر إلى إجهاد قيمته $0.45\,f_c$ (معاير القاطع).

٦-٦ النسبة المعيارية Modular Ratio (n)

وهى النسبة بين معاير المرونة للصلب (E_S) ومعاير المرونة للخرسانة (E_C) وهى مفيدة فى تصميم الخرسانة المسلحة بنظريات المرونة.

أى أن $$n = \frac{E_S}{E_C}$$

و معاير المرونة لصلب التسليح غالبا يتراوح بين ٢٠٠٠ إلى ٢١٠٠ طن/سم٢ أما بالنسبة للخرسانة فنظراً لأنها تتعرض لإجهادات متغيرة أو دائمة وأيضا إلى إجهادات نتيجة الزحف فإن قيمة معاير المرونة غالبا تؤخذ أقل من القيمة المقاسة معمليا. فإذا فرضنا أن معاير مرونة للخرسانة = ١٤٠ طن/سم٢ وللصلب = ٢١٠٠ طن/سم٢ فإن النسبة المعيارية (n) = ٢١٠٠ ÷ ١٤٠ = ١٥ أما فى حالة الخرسانة عالية المقاومة فقد يؤخذ معاير المرونة من ٢٠٠ إلى ٣٥٠ طن/سم٢ أى أن قيمة n قد تصل إلى ١٠ أو أقل.

٦-٧ نسبة بواسون Poisson's Ratio (ν)

هى النسبة بين الإنفعال العرضى الى الإنفعال الطولى عندما يؤثر على الخرسانة إجهاد ضغط فى حدود المرونة. وقيمة نسبة بواسون للخرسانة حوالى ٠,٢٠ فى حالة الحمل المؤثر ببطء أما إذا كان الحمل متزايد فتصل نسبة بواسون إلى حوالى ٠,٢٢ كذلك فإن نسبة بواسون تكون أقل نسبياً فى الخرسانة عالية المقاومة ، ونسبة بواسون لها أهميتها فى التحليل الإنشائى للبلاطات المسطحة والأنفاق ولكنها لا تؤخذ فى الإعتبار فى التصميمات العادية للخرسانة.

$$\nu = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_V}$$

حيث:

- ν هى نسبة بواسون
- ε_h الإنفعال العرضى
- ε_V الإنفعال الطولى

****