

المواد الرابطة المعدنية

تعريف المواد الرابطة المعدنية (اللاعضوية):

وهي مواد ناعمة كالبودرة تعطي عند خلطها بالماء عجينة لدنة، تتصلب وتتجمد تدريجياً بفعل العوامل الفيزيائية والكيميائية، الى أن تشكل مادة صلبة (الحجر الصناعي)، ويكون هذا التصلب بالهواء او تحت الماء.

*** تدعى المواد الرابطة التي تتصلب بالهواء بالمواد الرابطة الهوائية**

كالجص والكلس الهوائي، والتي تتصلب في الماء والهواء معاً **بالمواد الرابطة المائية** *hydraulic* كالاسمنت والكلس المائي حيث تتمتع بقدرة عالية على الالتصاق.

❖ مصادر المواد لإنتاج مواد رابطة معدنية:

- تعتبر الصخور الطبيعية والمخلفات الصناعية المصدر الاساسي لإنتاج المواد الرابطة المعدنية،
- أولاً- الصخور الطبيعية: ومن أهمها الصخور الكلسية الطرية، والصخور الغضارية، بالإضافة للصخور التالية:
 - ✓ الكبريتية: كالجص ...
 - ✓ الكربوناتية: كالكلس والحوار والرخام والدولوميت.
 - ✓ سيلكات الالمنيوم: نيفلين *nepheline*.
 - ✓ عالية الالمنيوم: بوكسيت *O*
 - ✓ المعدنية السيليكاكية: رمل كوارتزي، رماد بركاني "بوزولانا" دياتوميت *diatomite*

والتي تحتوي على الأكاسيد التالية:

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

حيث تشكل مجموعة الأكاسيد عند اماهتها بالماء الروابط المعدنية.

- ثانياً- المخلفات الصناعية: ومن أهمها الحمأة، الرماد المتطاير، خبث الأفران.

➤ تصنف الروابط المعدنية وفق سرعة اخذها (بدء التجمد) الى:

1. **روابط ذات تجمد سريع**: حيث بدء الاخذ أقل من 8 دقائق
2. **روابط ذات تجمد نصف بطيء**: حيث يتراوح زمن الاخذ بين 8 و 30 دقيقة
3. **روابط ذات تجمد بطيء**: حيث يتراوح زمن الأخذ بين 30 دقيقة و 6 ساعات.
4. **وروابط ذات تجمد بطيء جداً**: حيث يكون زمن الاخذ أكثر من 6 ساعات.

✦ ومن الاضافات المستخدمة للتحكم بزمن الاخذ:

1. **منشطات سطحية**: اضافات محبة للماء، و اضافات كارهة للماء
2. **مسرعات التصلب**: حمض كلور الماء HCl
3. **مبطئات التصلب**: جص ثنائي الماء O
4. **ملدنات** P : وتعرف بأنها مذيب عضوي غير طيار يشكل هلاماً مع المادة المستخدمة، ويستخدم لتحسين خواص تشكل المادة الخام مثل البنتونيت.

❖ آلية الحصول على المواد الرابطة المعدنية:

بعد تحضير المواد الخام من المقالع وانجاز عملية الخلط والطحن، تتم المعايرة وتصحيح النسب الداخلة. ثم يساق الخليط الى الافران المخصصة لتتم عملية الشوي والمعالجة الحرارية، حيث تبدأ المواد (المزيج) بفقد الماء الحر (غير المرتبط كيميائياً)، وبعد انتهاء مرحلة التبخر للماء ومع ارتفاع درجة الحرارة يبدأ بنزع الماء المرتبط كيميائياً حيث تتفكك وتتحلل الاكاسيد الأساسية، كل وفق درجة الحرارة الخاصة به. مع زيادة واستمرار المعالجة الحرارية تبدأ التفاعلات الكيميائية للأجسام الصلبة ويتبدل التركيب الكيميائي للخامات، حيث يترافق ذلك مع زيادة القدرة الحركية للجزيئات المكونة لها، وبالتالي مع ازدياد النشاط والقدرة الحركية لجزيئات العناصر، تنتشط السطوح الخارجية وتبدأ بالارتباط ببعضها مكونة بذلك عناصر ومواد جديدة، وكان كل هذه العناصر والجزيئات (للعنصر الواحد) تراجع وتارتدت للشبكة البلورية الاساسية لها، وأصبحت قادرة على أن تتحد وتلتصق مع أي بلورة أو جزيئة مجاورة لها لتشكل بذلك مركب جديد، ومع ارتفاع درجات الحرارة (الشوي) تتحول للطور السائل وتبدأ التفاعلات الكيميائية والتحولات الفيزيائية، مشكلة منتج جديد بصفات وخصائص جديدة، وبعد أن يتم التبريد والطحن نحصل على مادة ناعمة تدعى المادة الرابطة المعدنية. نستطيع بزيادة الطحن أن نزيد النعومة، وبالتالي زيادة السطح النوعي للمادة (المنتج الجديد)، مما يسمح بتسهيل عمليات الانحلال بالماء، وتسريع التفاعلات الكيميائية، وبالتالي تسريع التصلب وتشكيل مركبات مادة جديدة.

أولاً- الروابط المعدنية الهوائية:**§ 1- الجص Gypsum**

تعتبر الصخور الجصية الطبيعية المادة الخام الاساسية لإنتاج المواد الرابطة الجصية، والتي تتواجد في الطبيعة كحجر معدني كبريتي يحتوي على مينرالات الجص ثنائي الماء، وتعد كبريتات الكالسيوم المائية $CaSO_4 \cdot H_2O$ العنصر الأساسي المكون لها.

حيث تفقد ماء التبلور جزئياً أو كلياً وذلك بالتسخين والمعالجة الحرارية المطلوبة ضمن الأفران الدوارة، فعند درجات حرارة تصل بين 130 و 150 درجة مئوية تعطي الجص نصف المائي:



- بالقيام بعملية التبريد والطحن المناسبة نحصل على المادة الرابطة المعدنية الجصية ذات التصنيف β والتي نحصل عليها باستخدام الأفران الدوارة المفتوحة والمتصلة مع الهواء والضغط الخارجي بحيث تسمح للماء المحرر أن يتبخر على شكل بخار ساخن.
- أما في حالة المعالجة بالأفران المغلقة بشكل محكم ودرجات حرارة 100 – 95 درجة مئوية وتحت ضغط جوي يتراوح بين 0.15 – 0.3، ومع ازدياد درجات الحرارة والضغط الجوي داخل الأفران يزداد ضغط البخار ويتعذر تبخر الماء المرتبط بشكل حر، فيتم عندها نزع الماء المرتبط كيميائياً على شكل قطرة سائلة مشكلة بذلك جص نصف مائي من التصنيف α .

مما يؤدي لاختلاف في تركيب البنية البلورية بين الصنفين α و β ، وبالتالي اختلاف الصفات الفيزيائية للمنتج الجديد حيث تكون الكثافة:

الكثافة ρ	$\alpha = 2.72 - 2.75$	$\beta = 2.62 - 2.65$
----------------	------------------------	-----------------------

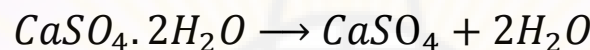
بناء عليه يتم تصنيف الجص إلى:

الجص البنائي: ينتج من المعالجة الحرارية لمطحون ثنائي الماء، ثم طحن الجص β بشكل ناعم للتخلص من البلورات الصغيرة التي قد تتشكل عند الخروج من الفرن، تبلغ مقاومة الجص البنائي $2 - 16 \text{ Mpa}$.
جص التشكيل (القولية): ينتج من زيادة الطحن للجص البنائي وبالتالي زيادة السطح النوعي مما يكسبه مقاومة أعلى ويساعد في استخدامه للقولية.
جص عالي المقاومة: ينتج من الطحن الناعم للجص α مع إضافة بعض المواد للأوتوكلاف (محاليل مائية لبعض الأملاح CaCl_2) حيث تعطي عند اماتهته وتصلبه منتج ذو مقاومة عالية $20 - 25 \text{ Mpa}$.

أيضا يمكن تصنيف الجص وفقاً لسرعة الأخذ:

1. جص سريع التصلب. $2 - 15 \text{ min}$.
2. جص عادي التصلب. $6 - 30 \text{ min}$.
3. جص بطيء التصلب. $20 \text{ min} - \text{unlimite}$.

- عند استخدام أفران ذات درجات حرارة أعلى من 200 درجة مئوية، قد تصل إلى 950 درجة مئوية، نحصل على أنواع الجص اللامائي (الانهدريت، استرخ جبس)



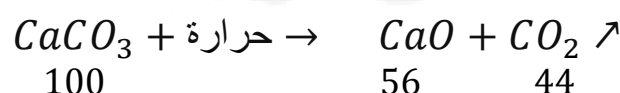
وهو ذو كلف عالية ويستخدم لأغراض صناعية ويكون ذو مقاومة تصل إلى $10 - 20 \text{ Mpa}$.

- إن تعدد التصنيفات والأنواع للجص المنتج، وأيضاً اختلاف نسبة كبريتات الكالسيوم في المادة الخام، يفسح المجال أمام استخدامات متعددة له:
 الجدران والقواطع الداخلية، مواد إكساء والديكورات، تشطيب (دهان) أسطح الجدران، مواد رابطة للأحجار والبلاط (مونة رابطة)، عناصر ماصة للصوت والحرارة والنار....
 ولكن تبقى هذه الاستخدامات مشروطة بعدم تجاوز الرطوبة للجو المحيط على 70%، وفي حال التماس المباشر للمنتج الجصي مع الرطوبة يلزم حينها معالجة السطح بمواد طاردة للمياه أو إضافة مواد كارهة للماء بشكل مباشر للمنتج أثناء الخلط.

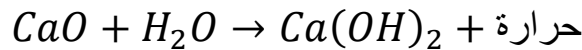
2- الكلس الهوائي *Nonhydraulic lime*

يوجد في الطبيعة الحجر الكلسي مثل الحوار، الحجر الكلسي الدولوميتي الحاوي على نسبة غضار لا تتجاوز ال 6% والذي يعتبر المادة الخام الأساسية لانتاج الكلس.

حيث يتم الحرق ضمن أفران على شكل نفق، زويدة حلزونية أو دائرية اسطوانية ذات طبقات ساخنة أو على شبكات تجميعية، وبعد الشوي نحصل على الكلس الحي، أو نسميه الكلس الفوار (غير المطفأ) على شكل قطع، وفق التفاعل التالي: بدراسة الأوزان الذرية نجد:

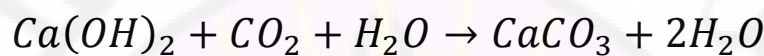


الكلس الحي الناتج يجب تحويله الى مسحوق ناعم، ويتم ذلك بإطفائه بالماء، حيث يتم إضافة الماء وتحويله إلى ماءات الكالسيوم (هيدروكسيد الكالسيوم) أي يتحول إلى كلس مطفأ بعد انحلاله بالماء وفق التفاعل التالي:



عند تفاعله مع الماء يتشكل بالفوارن منتج ذو مسامية عالية مع تحرير كمية كبيرة من الطاقة (تفاعل ناشر للحرارة) وهذا ما يسمى إطفاء الكلس، حيث يلزم لذلك 32% من وزنه ماء، لكن ونظراً لتحول جزء كبير من الماء لبخار أثناء التفاعل فيتطلب ذلك زيادة النسبة لحدود 80%. ويدخل البخار المنطلق بإعادة التفاعل محولاً كتل الكلس إلى جزيئات ناعمة وصغيرة (مسحوق) وبسطح نوعي عالي. تلعب كمية الماء المستخدمة لإطفاء الكلس دوراً بنوع المنتج حيث يتدرج من مسحوق رخو كلسي عند النسبة 1/1 إلى أن نحصل على عجينة كلسية عند النسبة (ماء) 1/3 (كلس) ومترافقة مع ازدياد في الحجم الناتج.

تعتبر ماءات الكالسيوم (الكلس المطفأ) مركب غير مستقر في الماء (أي يمكن أن ينحل بالماء)، ولكنه يستطيع أن يتصلب ببطء في الهواء (بفعل الكربنة) أي بوجود غاز ثنائي أكسيد الكربون وفق التفاعل التالي:

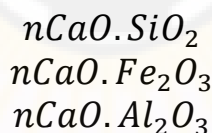


إن تصلب الكلس المطفأ يتم ببطء (بداية ونهاية أخذه) وتكون مقاومته ضعيفة ومنخفضة، لذلك ينحصر استخدامه بمجالات المونة وربط الأحجار والبلاط، كما يستخدم أيضاً في مجالات صناعية كصناعة الورق، وأيضاً المجالات الزراعية لمعالجة عيوب الترب الزراعية.

ثانياً- الروابط المعدنية المائية

⌘ 1- الكلس المائي *Hydraulic lime*

ينتج من شوي الأحجار الكلسية المارلية الحاوية على كمية من الغضار تتراوح بين 20% – 6 ضمن أفران بدرجة حرارة بين 900 – 1100 درجة مئوية، حيث يتفكك بداية الغضار للأكاسيد الأساسية المكونة له ($Al_2O_3 - Fe_2O_3 - SiO_2$) ثم تتحد هذه الأكاسيد مع ناتج شوي الحجر الكلسي CaO مشكلة المينرالات التالية:



والتي يمكن أن تتصلب بالهواء والماء معاً، مشكلة حجر صناعي صلب بعد أن يتميه بالماء، كما ويتبقى كمية من أكسيد الكالسيوم CaO بشكل حر في الكلس المائي، ينزع إلى الإطفاء بتأثير الماء مثل الكلس الهوائي، ويتحدد نوع وشكل التصلب من كمية أكسيد الكالسيوم الحر، فكلما قلت هذه الكمية كانت إمكانية التصلب في الماء أفضل، مما يستدعي أحياناً أن يبدأ الكلس تصلبه بالهواء ثم يتابع تصلبه بالماء.

يتميز الكلس المائي بالنعومة والمتانة إذ يصل بعمر 28 يوم لـ $2Mpa$ ويستخدم بأعمال المونة البنائية.

⌘ 2- الاسمنت البورتلاندي *Portland Cement*: سوف نتكلم عنه في الدرس القادم.

انتهت المحاضرة

الاسمنت يتبع الروابط المعدنية المائية:

2- الاسمنت:



يعتبر الاسمنت أهم مادة رابطة مائية، يستعمل بشكل واسع في تحضير البيتون، والبيتون المسلح، والمونة الاسمنتية (في الورشات، والأبنية السكنية، والأبنية مسبقة الصنع، والمنشآت المائية، والطرق والمطارات). ويمكن تعريفه على أنه: رابطة معدنية مائية، يمكنه التصلب في الهواء والماء معاً، نحصل عليه من طحن المزيج الناتج عن شوي الأحجار الكلسية والغضار.

الاسمنت البورتلاندي:

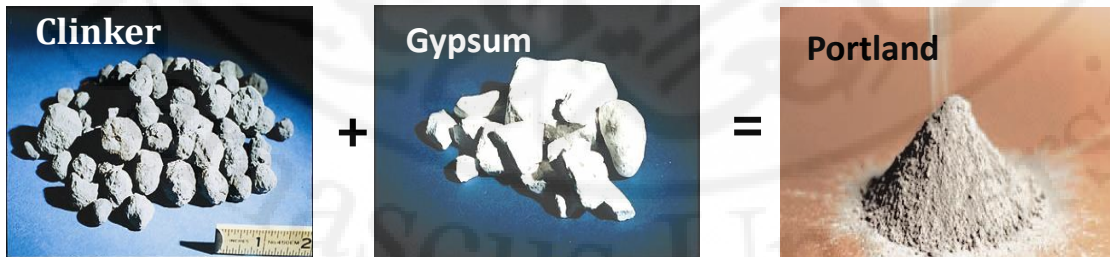
وهو عبارة عن مسحوق رمادي اللون، يمكنه التصلب في الماء والهواء، وقد أطلق عليه اسم البورتلاندي بسبب التشابه الكبير بين الاسمنت بعد تصلبه، والأحجار الرمادية المنتشرة في جزيرة "بورتلاندي" على السواحل البريطانية، وهو يلعب دوراً أساسياً في مجالات البناء الحديثة، ويعتبر أكثر الأنواع استخداماً كونه الأفضل والأكثر اقتصادية، يستخدم في المنشآت العادية حيث لا ضرورة لمواصفات خاصة كالمقاومة للمواد الكيماوية - سرعة التصلب - سرعة التماسك العالية - ألوان خاصة.

انتاج الاسمنت:

تختلف صفات الاسمنت وتركيبه الكيميائي والمينرالي بحسب اختلاف المواد الخام الداخلة في تركيبه، واختلاف التكنولوجيا المستخدمة في صناعته.

ان معرفة التركيب المينرالي يساعد في معرفة الصفات الفيزيائية، والميكانيكية الرئيسية للاسمنت، وفي تصميم الاسمنت للبيتون بحسب الظروف الاستثمارية له.

يتم الحصول على الاسمنت البورتلاندي من شوي مزيج الأحجار الكلسية والغضار، بحيث يضمن تشكل سيليكات الكالسيوم في المادة المشوية، والتي تسمى بالكلينكر، وهو على شكل حبيبات يصل قطرها إلى (40 mm)، ومن ثم يتم طحنها إلى بودرة ويضاف إليها الجبس للحصول على الاسمنت.



العمليات التكنولوجية في انتاج الاسمنت:

تحضير المواد الخام - تحضير المزيج - شوي المزيج - طحن الكلينكر مع المواد المضافة للحصول على مسحوق ناعم.

📌 تقييم جودة الكلينكر:

تتعلق جودة الكلينكر بتركيبه الكيميائي والمينرالي، حيث يجب أن تتألف المواد الخام للاسمنت من كربونات الكالسيوم بنسبة % (75)، ومن المادة الغضارية بنسبة % (25)، ولا توجد في الطبيعة صخور طبيعية تحوي هذه النسب إلا ما ندر، ولهذا يعمد إلى خلط المواد الخام الحاوية على مختلف الأكاسيد، أو إضافة بعض المواد الخام الحاوية على أكاسيد معينة بنسبة عالية.

تتألف الأحجار الكلسية بشكل رئيسي من كربونات الكالسيوم CaCO_3 .

ويتألف الغضار من عدة أكاسيد معدنية تحتوي بشكل رئيسي على ثلاثة أكاسيد أساسية وهي:

أكسيد السيليسيوم، أكسيد الألمنيوم، أكسيد الحديد.

وبعملية الشوي يتطاير ثاني أكسيد الكربون، وتتشكل أربعة مينرالات رئيسية في الكلينكر وهي:

جدول (1): المينرالات الرئيسية في الكلينكر

الصيغة الكيميائية	الاختصار	اسم المينرال	نسبته النظامية % مجاله النظامي
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	سيليكات ثلاثية الكالسيوم (Alite)	57 (37-65)
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	سيليكات ثنائية الكالسيوم (Belite)	16 (10-37)
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	الومينات ثلاثية الكالسيوم (Alominate)	9 (5-15)
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	ألومينات الحديد رباعية الكالسيوم (Ferrite)	10 (6-18)

حيث تستخدم الاختصارات التالية: $(\text{CaO}): \text{C}$, $(\text{SiO}_2): \text{S}$, $(\text{Fe}_2\text{O}_3): \text{F}$, $(\text{Al}_2\text{O}_3): \text{A}$, $(\text{H}_2\text{O}): \text{H}$. عدا عن هذه المينرالات الرئيسية يمكن أن يتواجد في الكلينكر أكاسيد حرة غير متحدة وهي ضارة، مثل: أكسيد الكالسيوم الحر (CaO) ، أكسيد المغنيزيوم (MgO) ، وأكسيد البوتاسيوم (K_2O) ، وأكسيد الصوديوم (Na_2O) ، وجود مثل هذه الأكاسيد يخفض من جودة الاسمنت.

يجب ألا يحتوي الكلينكر على أكسيد الكالسيوم الحر (CaO) ، حيث أنه مثل أكسيد المغنيزيوم (MgO) المشوي بدرجة حرارة 1500°C ، ينطفئ ببطء شديد مع ازدياد في حجمه مما يتسبب في تشقق الببتون المتصلب.

دور الجبس (gypsum) في تنظيم بداية ونهاية تجمد الاسمنت:

يتميز الكلينكر المطحون الصافي ببداية سريعة للأخذ حوالي (3-5) دقيقة، لذا عملياً لا يمكن استعماله لوحده من دون إضافة مواد تؤخر زمن بداية الأخذ مثل الجبس، حيث يضاف بنسبة % (1.5-3.5) من وزن **الكلينكر**، وقد تصل في بعض الأحيان إلى 5%، حيث يتفاعل الجبس مع الومينات الكالسيوم المائية ويتشكل ملح لا ينحل بالماء، لذا يجب أن تكون نسبة الجبس المضافة متناسبة مع كمية (C_3A) الموجودة في الكلينكر، بحيث لا تقل عن (1.5%) من **وزن الكلينكر**، ولا تزيد على (3.5%).

إن الاسمنت الحوي على هذه النسبة من الجبس يكون فيه بداية الأخذ لا تقل عن (45) دقيقة، ونهاية الأخذ لا تزيد على (12) ساعة ابتداء من لحظة خلط الماء مع الاسمنت.

تصلب الاسمنت البورتلاندي وتشكل بنيته:

بمزج الاسمنت مع الماء تتشكل عجينة اسمنتية لدنة صمغية، تتكثف تدريجياً وتتحول إلى الحالة الصلبة. توجد عدة نظريات تشرح نظرية التصلب، منها **نظرية بابكوف** وبحسبها يقسم تصلب الاسمنت إلى ثلاثة مراحل:

(1) الانحلال.

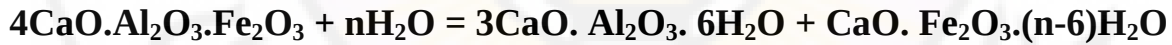
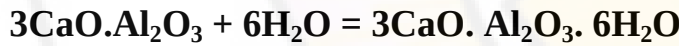
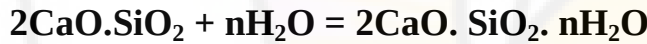
(2) التميح والتحول إلى البنية الغروية، (العنصر المسؤول عن تشكل المادة الغروية هو (CaO))

(3) التبلور ثم التصلب.

فعند خلط الاسمنت مع الماء يحدث تأثير معقد فيزيائي كيميائي متبادل:

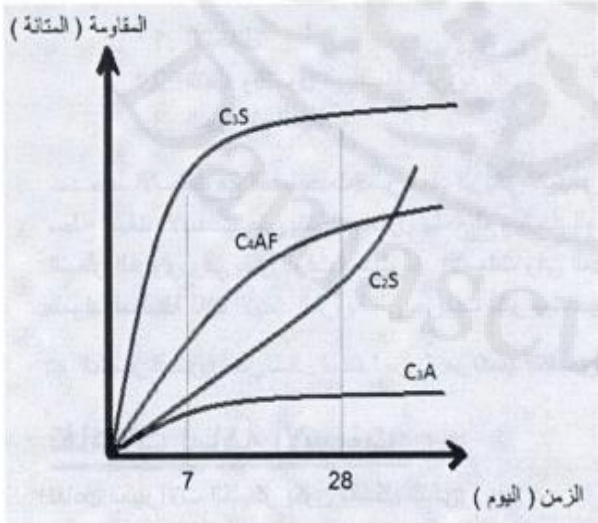
- ففي البداية تنحل مینرالات الكلینکر من سطح حبات الاسمنت حتى يتشكل محلول مشبع.
- ثم باتحاد الماء مع المینرالات تتشكل اتحادات مائية عالية التبعثر الغروي، وبالوقت ذاته يحدث اخذ للاسمنت (تصلب).
- وفي المرحلة الأخيرة تحدث عمليات إعادة تبلور جزيئات المواد المتشكلة ذات الأبعاد الغروية إلى جزيئات أكبر، يصاحبه تصلب العجينة الاسمنتية وزيادة متانتها.

إن تفاعل مینرالات الكلینکر مع الماء يكون بالشكل التالي:



تختلف سرعة تفاعل المینرالات مع الماء، أسرعها هو تفاعل (C_3A) مع الماء، ثم (C_4AF) ، ثم (C_3S) ، وأبطأها هو تفاعل (C_2S) ، انظر الشكل المجاور.

تؤثر سرعة تميح مینرالات الكلینکر على سرعة تصلبها.



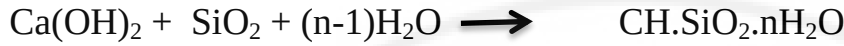
إن C_3A هو أول مینرال يدخل في تفاعل الاماهة، ويكون في الدقائق الأولى كتلة صلبة (لأن الألمنيوم هو العنصر الأكثر نشاطاً)، لذا نعد إلى زيادة نسبته في حال أردنا الحصول على اسمنت سريع الأخذ، وأما إذا أردنا تفاعلات متأخرة فإننا نزيد من نسبة C_2S .

نلاحظ من الشكل المجاور أنه لو أردنا اسمنت مقاومه المبكرة كبيرة فإننا نأخذ قيمة C_3S كبيرة أي اسمنت آليتي، أما إذا أردنا الحصول على متانة عالية بوقت متأخر نستعمل اسمنت بيلييتي C_2S . يمكن صنع

الاسمنت من دون اضافات، أو مع اضافة مواد فعالة بنسبة تصل إلى (15%) من وزن الاسمنت.

دور المواد الفعالة المائية هو منع تأثير الماء على الحجر الاسمنتي.

تحتوي المواد الفعالة المائية على أكسيد السيليسيوم (SiO_2) في الحالة غير المتبلورة، لذا فهو يتفاعل مع ماءات الكالسيوم Ca(OH)_2 الناتجة من تمييه C_3S ، وتتشكل سيليكات الكالسيوم المائية (C-S-H) التي لا تتحلل في الماء، وبالتالي تعمل على رفع مقاومة البيتون ضد الماء. أي:

❖ عيار الاسمنت :

يعرف عيار الاسمنت على أنه كمية الاسمنت اللازمة لصنع متر مكعب واحد من الخرسانة، ويتم تحديد عيار الاسمنت في تصميم الخلطات البيتونية من أجل الحصول على المقاومة المطلوبة، كما سندرس لاحقاً في تصميم الخلطات البيتونية.

تأثير عيار الاسمنت على خصائص الخرسانة الطازجة والمتصلبة :

- 1- تزداد درجة تشغيل الخلطة الطازجة مع زيادة عيار الاسمنت، لأن ذلك يزيد من حجم العجينة الاسمنتية والتي تعطي الحجم الطري للخلطة.
- 2- يزداد الوزن الحجمي للخلطة تبعاً لعيار الاسمنت، ويعطي قيمته العظمى من أجل عيار للاسمنت بين $300-400 \text{ Kg/m}^3$.
إذا كان $C < 300$ ، تصبح العجينة الاسمنتية غير كافية لملء الفراغات بين الحصى، مما يزيد من نسبة الفراغات ويقلل الوزن الحجمي للخلطة.
وإذا كانت $C > 400$ ، يزداد حجم العجينة الاسمنتية على حساب حجم الحصى، وبما أن الوزن النوعي الكلي للعجينة الاسمنتية أقل من الوزن النوعي للحصى، فهذا يقلل الوزن الحجمي للخلطة البيتونية.
- 3- تزداد مقاومة الخلطة على الضغط تبعاً لعيار الاسمنت الى حد معين $300-400 \text{ Kg/m}^3$ حيث تثبت المقاومة بعدها.
إن زيادة عيار الاسمنت يزيد السطح النوعي، مما يسبب زيادة كمية الماء وبالتالي نقصان المقاومة، إضافة الى أن زيادة عيار الاسمنت يسبب زيادة العجينة الاسمنتية والتي تقلل من ارتكاز الحصى على بعضها البعض، وتقطع الاستناد بينها، مما يقلل من مقاومة الخلطة.
أما نقصان عيار الاسمنت فيقلل من حجم العجينة الاسمنتية، وتصبح غير كافية لملء الفراغات بين الحصى، مما يسبب زيادة نسبة الفراغات، وبالتالي انخفاض مقاومة الخلطة البيتونية.
- 4- تزداد تشوهات التقلص والتشوهات (المرنة – اللزجة – اللدنة) للبيتون كلما زاد عيار الاسمنت.

يبين الجدولين (4-10)، و(4-11) من الكود السوري لعام 2012 الطبعة 4، العلاقة بين عيار الاسمنت (كمية الاسمنت بالـ Kg اللازمة لإنتاج 1 m^3 خرسانة)، وبين جودة الخرسانة (مقاومتها المميزة على الضغط f'_c بعمر 28 يوم لعينات اسطوانية قياسية $150\phi \times 300$ mm)

الجدول (٤-١٠): مقاومة الضغط المميزة المحتملة في حالة الخرسانة المراقبة بشكل دقيق

450*			400		350	300	كمية الأسمنت kg/m ³	
C45	C40	C35	C30	C25	C20	C18	درجة جودة الاسطوانة	
45	40	35	30	25	20	18	MPa	المقاومة الاسطوانية
450	400	350	300	250	200	180	kgf/cm ²	المميزة المحتملة f' _c

الجدول (٤-١١): مقاومة الضغط المميزة المحتملة في حالة الخرسانة غير المراقبة بشكل دقيق

450*	400	350	300	250	200	150	100	كمية الأسمنت kg/m ³	
C25	C20	C18	C15	C12	C10	C8	C5	درجة جودة الخرسانة	
25	20	18	15	12	10	8	5	MPa	المقاومة الاسطوانية
250	200	180	180	120	100	80	50	kgf/cm ²	المميزة المحتملة f' _c
خرسانة مسلحة				خرسانة عادية		نظافة تحت الأساسات		ردم	مجال الاستعمال

* مع ضرورة إضافة ملدنات عالية الجودة super plasticizer وسيليكا فيوم silica fume.

🚩 ماركة الاسمنت:

تعرف ماركة الاسمنت على أنها حد المتانة على الضغط بعمر 28 يوم، لعينات مكعبية من المونة الاسمنتية النظامية بوحدة MPa، والتي تتكون وفق المواصفة الأوربية (EN 196-1) من (1:3:0.5)، أي: (1 اسمنت، و3 رمل كوارتزي قاسي، و0.5 ماء)، وبناءً عليها يتم تصنيف الاسمنت إلى 3 (ماركات) وهي: 32.5، 42.5، 52.5، كما هو مبين في الجدول التالي:

Strength class صنف المقاومة (رتبة الاسمنت)	Compressive strength MPa			
	Early strength المقاومة المبكرة		Standard strength المقاومة القياسية	
	2 days يومان	7 days سبعة ايام	28 days ثمان و عشرون يوماً	
32.5L	-	≥12.0	≥32.5	≤52.5
32.5N	-	≥16.0		
32.5R	10.0≥	-		
42.5L	-	≥16.0	≥42.5	≤62.5
42.5N	10.0≥	-		
42.5R	≥20.0	-		
52.5L	≥10.0	-	≥52.5	-
52.5N	≥20.0	-		
52.5R	≥30.0	-		

حيث: L: اسمنت ذو مقاومة ابتدائية منخفضة، N: اسمنت ذو مقاومة ابتدائية عادية، R: اسمنت ذو مقاومة ابتدائية عالية.

العوامل المؤثرة على مقاومة الاسمنت على الضغط:

هناك عدة عوامل من أهمها:

- 1- تركيب الاسمنت: بزيادة C_3S تزداد المقاومة المبكرة، وبزيادة C_2S تنخفض المقاومة المبكرة.
- 2- نعومة الاسمنت : طردية (بزيادتها تزداد المقاومة).
- 3- درجات الحرارة والرطوبة: تأثير درجات الحرارة عكسي، وتأثير الرطوبة طردية.
- 4- نسبة الماء / الاسمنت: عكسية (بزيادتها تقل المقاومة).
- 5- نسبة الرمل: عكسية.

أنواع الاسمنت البورتلاندي :

1- حسب تركيبه المينرالي:

- 1- الاسمنت عالي الآليت، يحتوي على (C_3S) أكثر من 60%.
- 2- الاسمنت الآليني، يحتوي على (C_3S) بين 50% إلى 60%.
- 3- الاسمنت البيليني، يحتوي على (C_2S) أكثر من 35%.
- 4- الاسمنت الألوميناتي، يحتوي على (C_3A) أكثر من 12%.
- 5- الاسمنت السيليني، يحتوي على (C_3A) أقل من 2%، وعلى (C_4AF) أكثر من 18%.

2- حسب المواصفة الأمريكية (ASTM C109):

يتم وفق هذه المواصفة تصنيف الاسمنت البورتلاندي إلى 5 أصناف مختلفة، كما هو مبين في الجدول التالي:

مقاومة الضغط: Compressive Strength (MPa)				Cement type
28days	7days	3days	1day	نوع الاسمنت
28	19	12	-	I
22	16	10	-	IA
28	17	10	-	II
22	14	8	-	IIA
-	-	24	12	III
-	-	19	10	IIIA
17	7	-	-	IV
21	21	8	-	V

حيث:

I: عادي، IA: عادي مع مولدات فقاعات، II: مقاومته للكبريتات متوسطة، IIA: مقاومته للكبريتات متوسطة مع مولدات فقاعات، III: مقاومة مبكرة عالية، IIIA: مقاومة مبكرة عالية مع مولدات فقاعات، IV: منخفض حرارة التمييه، V: مقاومته للكبريتات عالية.

3- حسب المواصفة الأوروبية (EN 197-1:2011):

يتم وفق هذه المواصفة تصنيف الاسمنت البورتلاندي إلى 27 صنف مختلف حسب نسبة المادة الفعالة فيه (الكليكر)، ونسب الإضافات ان وجدت فيه، كما هو مبين في الجدول التالي:

Cement type	Notation	Clinker %	Addition %
CEM I	Portland cement CEM I	95-100	-
CEM II	Portland-slag cement II/A-S	80-94	6-20
	II/B-S	65-79	21-35
	Portland-silica fume cement II/A-D	90-94	6-10
	Portland-pozzolana cement II/A-P	80-94	6-20
	II/B-P	65-79	21-35
	II/A-Q	80-94	6-20
	II/B-Q	65-79	21-35
	Portland-fly ash cement II/A-V	80-94	6-20
	II/B-V	65-79	21-35
	II/A-W	80-94	6-20
	II/B-W	65-79	21-35
	Portland-burnt shale cement II/A-T	80-94	6-20
	II/B-T	65-79	21-35
	Portland-limestone cement II/A-L	80-94	6-20
	II/B-L	65-79	21-35
	II/A-LL	80-94	6-20
	II/B-LL	65-79	21-35
CEM III	Portland-composite cement II/A-M	80-94	6-20
	II/B-M	65-79	21-35
	Blastfurnace cement III/A	35-64	36-65
CEM IV	III/B	20-34	66-80
	III/C	5-19	81-95
CEM IV	Pozzolanic cement IV/A	65-89	11-35
	IV/B	45-64	36-55
CEM V	Composite cement V/A	40-64	36-60
	V/B	20-38	61-80

انتهت المحاضرة الثانية

المحاضرة الثالثة والاعيرة: تكنولوجيا صناعة الخرسانة

د. رباب جوني

تعريف الخرسانة concrete: هي بنية structure مكون من عدة مواد materials، الجزء الأكبر في هذا البنية هو الحصىات aggregates، التي تتماسك مع بعضها البعض في صورة شبيهة بالكتلة الحجرية، وذلك بفعل العجينة الاسمنتية cement paste المخلطة للحصىات، والتي تتصلب نتيجة التفاعل الكيميائي بين الاسمنت والماء.

حصىات (خشنة وناعمة)	عجينة اسمنتية	فراغات هوائية
% 60-70	% 30-40	% 1-2

Concrete pavement

وهي المادة الانشائية الأكثر استخداماً في العالم، وتعزى شعبيتها لسببين هما:

1- استخدامه في العديد من المنشآت المختلفة، مثل: السدود، الرصف الطرقي، الأبنية، الإطارات أو الجسور، أكثر من غيره من المواد الانشائية الأخرى.

2- كمية البيتون المستخدم أكبر من أية مادة أخرى. يزيد انتاج البيتون في العالم على انتاج الفولاذ بعشرة أضعاف وزناً، وأكثر من 30 ضعف حجماً.

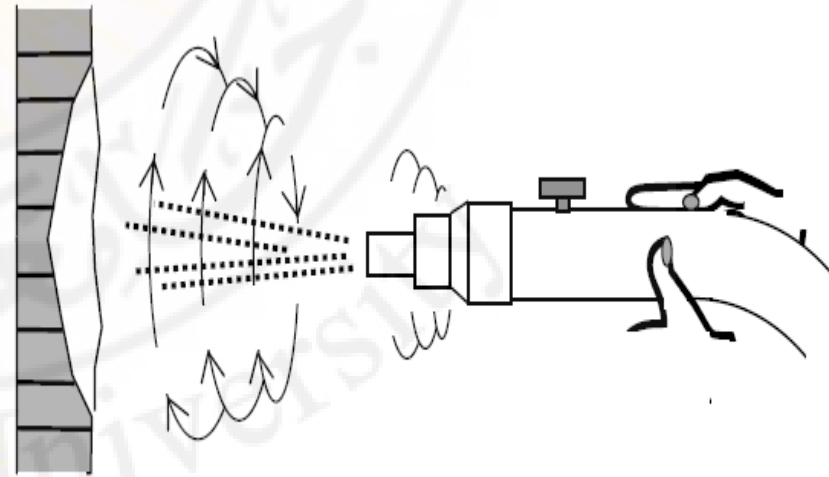
TYPES OF CONCRETE:

أنواع الخرسانة

يوجد العديد من أنواع الخرسانة، يمكن أن نذكر منها الأنواع التالية:

- 1- الخرسانة العادية
- 2- الخرسانة المسلحة
- 3- الخرسانة مسبقة الاجهاد
- 4- الخرسانة مسبقة الصنع (الصب)
- 5- الخرسانة عالية المقاومة
- 6- الخرسانة الليفية
- 7- الخرسانة ذاتية التوضع (الدمك)
- 8- الخرسانة البوليميرية
- 9- الخرسانة المقذوفة (خرسانة الرش)
- 10- الخرسانة الخفيفة
- 11- الخرسانة الثقيلة
- 12- الخرسانة الكتلية
- 13- الخرسانة المعبأة
- 14- خرسانة التدرج المفتوح
- 15- الخرسانة المعمارية
- 16- الخرسانة الكبريتية

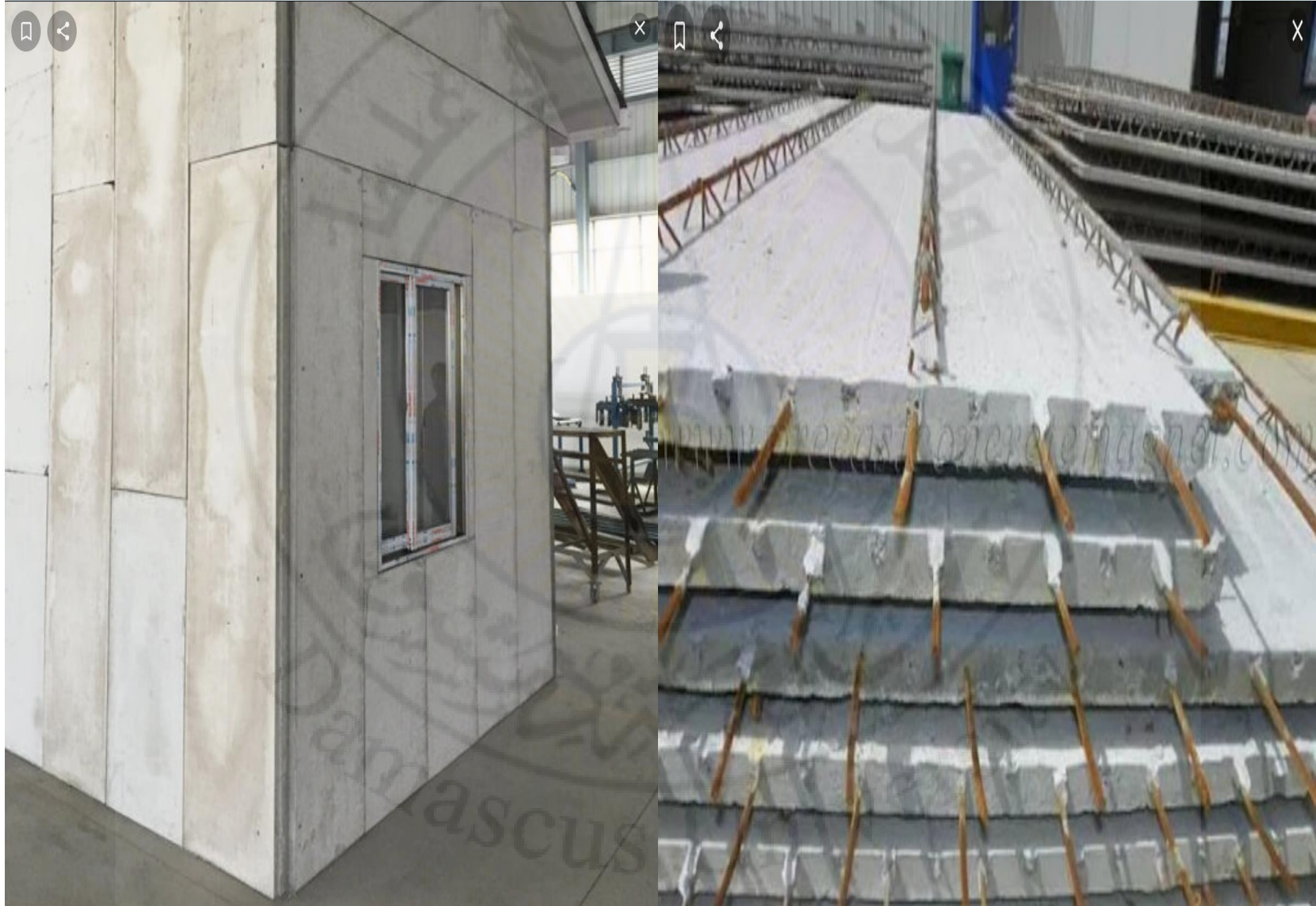
الخرسانة المقذوفة



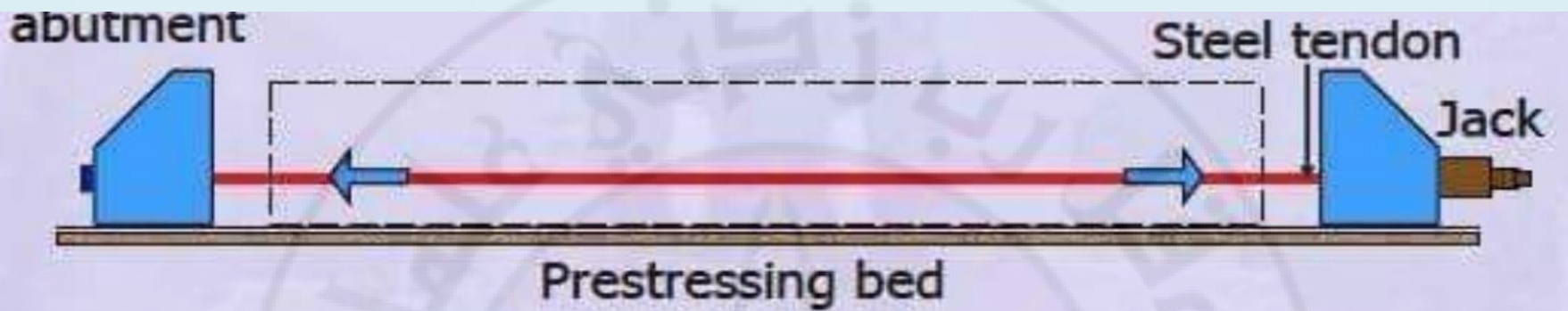
شكل (٣-٢٠) صورة توضح إستخدام الخرسانة المقذوفة في أحد الأنفاق.

حركة دورانية خفيفة في فوهة الدفع لإنتاج خرسانة مقذوفة جيدة

الخرسانة مسبقة الصنع



الخرسانة مسبقة الاجهاد



(a) Applying tension to tendons



(b) Casting of concrete

Cutting of tendon



(c) Transferring of prestress

Figure1-3.1 Stages of pre-tensioning

CLASSIFICATION OF CONCRETE : تصنيف الخرسانة

Table 1.1: Classification of concrete in accordance with unit weight

	Classification	Unit Weight (Kg/m ³)
خفيف جدا	Ultra-lightweight concrete	<1200
خفيف	Lightweight concrete	1200 < UW < 1800
عادي	Normal-weight concrete	~2400
ثقيل	Heavyweight concrete	>3200

Table 1.2: Concrete classified in accordance with compressive strength

	Classification	Compressive Strength (MPa)
منخفض المقاومة	Low-strength concrete	<20
متوسط المقاومة	Moderate-strength concrete	20–50
عالي المقاومة	High-strength concrete	50–150
عالي المقاومة جدا	Ultra-high-strength concrete	>150

جودة الخرسانة: QUALITY OF CONCRETE:

تصنف درجات جودة الخرسانة واستعمالاتها وفق الكود السوري - الطبعة 4- 2012، كما هو مبين في الجداول التالية:

الجدول (٤-٩): درجات جودة الخرسانة واستعمالاتها المناسبة

C 12	C 10	C 8	C 5	درجة الجودة	
12	10	8	5	Mpa	المقاومة المميزة بالضغط f' _c
120	100	80	50	kgf/cm ²	
خرسانة عادية (أساسات - جدران الخ)		خرسانة للنظافة تحت الاساسات	خرسانة ردمية	مجال الاستعمال	

C45	C40	C 35	C 30	C 25	C 20	C 18	C15	درجة الجودة	
45	40	35	30	25	20	18	15	MPa	المقاومة المميزة بالضغط f' _c
450	400	350	300	250	200	180	150	kgf/cm ²	
خرسانة مسلحة وخرسانة مسبقة الإجهاد				خرسانة مسلحة				مجال الاستعمال	

ولا تستعمل خرسانة من درجة جودة أعلى من C45 إلا في حالة الخرسانة المسبقة الإجهاد،
كذلك لا تستعمل خرسانة من درجة جودة أدنى من C18 في الخرسانة المستعملة للمباني
والمنشآت التي ستتخذ من الخرسانة المسلحة في مناطق الزلازل.

الجدول (٤-١٠): مقاومة الضغط المميزة المحتملة في حالة الخرسانة المراقبة بشكل دقيق

450*			400		350	300	كمية الأسمنت kg/m^3	
C45	C40	C35	C30	C25	C20	C18	درجة جودة الاسطوانة	
45	40	35	30	25	20	18	MPa	المقاومة الاسطوانية
450	400	350	300	250	200	180	kgf/cm^2	المميزة المحتملة f'_c

الجدول (٤-١١): مقاومة الضغط المميزة المحتملة في حالة الخرسانة غير المراقبة بشكل دقيق

450*	400	350	300	250	200	150	100	كمية الأسمنت kg/m^3	
C25	C20	C18	C15	C12	C10	C8	C5	درجة جودة الخرسانة	
25	20	18	15	12	10	8	5	MPa	المقاومة الاسطوانية
250	200	180	180	120	100	80	50	kgf/cm^2	المميزة المحتملة f'_c
خرسانة مسلحة				خرسانة عادية		نظافة تحت الأساسات		ردم	مجال الاستعمال

* مع ضرورة إضافة ملدنات عالية الجودة super plasticizer وسيليكا فيوم silica fume.

الجدول (٤-١٢): مقاومة الشد المميزة المحتملة

C45	C40	C35	C30	C25	C20	C18	C15	C12	C10	درجة جودة الخرسانة	
2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.0	1.9	1.7	1.5	1.4	MPa	المقاومة المحتملة
26	25	24	23	22	20	19	17	15	14	kgf/cm^2	للخرسانة في الشد

صناعة الخرسانة (Manufacture of Concrete)

يمكن تقسيم المراحل التي تمر بها صناعة الخرسانة إلى ثلاث مراحل رئيسية وهي:

مرحلة ما بعد الصب
Green Concrete

- 1- المعالجة curing.
- 2- فك قوالب الكوفراج
- 3- الترميم والبياض.
- 4- التشطيب finishing

مرحلة الصب
Fresh Concrete

- 1- الخلط mixing
- 2- النقل transporting
- 3- الصب casting
- 4- الرص compacting

مرحلة ما قبل الصب
Preparation

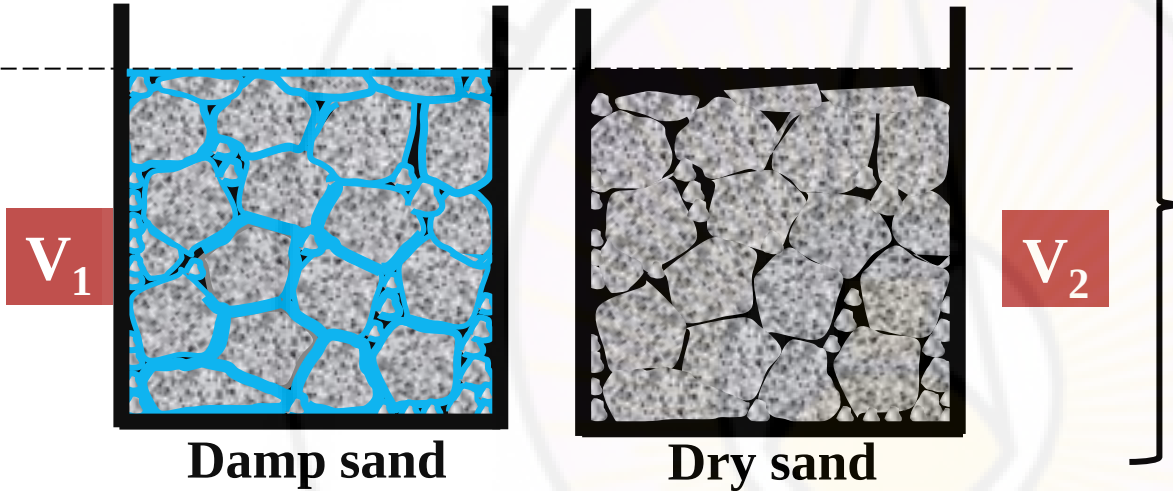
- 1- اختيار المكونات، وتصميم الخلطات.
- 2- تخزين المواد
- 3- إعداد قوالب الكوفراج
- 4- تحضير الكميات والعبوات

- 1:- تحضير المواد المكونة للخلطة **BATCHING**
- 2:- الخلط **MIXING**
- 3:- النقل **CONVEYING (Transport)**
- 4:- الصب **PLACING**
- 5:- الرص **COMPACTING**
- 6:- الانتهاء **FINISHING**
- 7:- الانضاج (المعالجة) **CURING**
- 8:- إزالة قوالب الكوفراج **FORMWORK REMOVAL**

1- تحضير كميات مواد الخلطة BATCHING:

- **Batching:** يقصد بها قياس كميات المواد اللازمة لتحضير خلطة واحدة من البيتون، وتتم عادة بالطريقة الوزنية أكثر منها بالطريقة الحجمية، لأن الرمل الرطب يأخذ حجماً أكبر من الرمل الجاف بينما تكون كتلته أقل من المطلوب.

$$V_1 > V_2 \rightarrow m \text{ is less than needed}$$



2- الخلط MIXING:

- يتم تحضير مكونات الخليط في المجبل المركزي، أما الخلط فيتم إما في الجباله المتحركة على الطريق، أو قبل الصب مباشرة في موقع العمل.

- **Mixing:** يجب أن يؤمن الخلط تغليفاً كاملاً للحصويات بالملاط الاسمنتي، وينتج عنه خليطاً متجانساً، لذا يجب أن يكون زمن الخلط بحدود 75 Sec لأنه إذا زاد عن ذلك تفقد الخلطة ماؤها، وتتكرس الحصويات. وإذا قل عن ذلك لا نحصل على خليط متجانس.
- يمكن أن يجري الخلط يدوي أو آلي، في موقع العمل أو في المجبل.



- يجب أن نحافظ على تجانس الخليط البيتوني الذي حققناه أثناء الخلط، عند نقله إلى موقع العمل، ولكي نضمن عدم حدوث ظاهرة الانفصال يجب أن يتم وضعه أقرب ما يكون إلى وضعه النهائي على شكل طبقات أفقية متماثلة بالسماكات، ويجب أن يتم الصب بسرعة.



(c) Transit mixers

- يجب إعادة الخلط قبل لحظة الصب مباشرة.
- إذا تعرضت الخلطة للجفاف والتصلب في الجو الحار وعند هبوب الرياح الشديدة، عندها يجب إعادة خلطها من جديد قبل الصب.

3- النقل والصب (CONVEYING (TRANSPORT) & placing:

يتم نقل وصب البيتون بعدة طرق منها:

- سيور ناقلة Conveyor belts
- أقنية مائلة Chute
- رافعات، طريقة الدلو والحبل Crane, bucket and rope way
- خط أنابيب ومضخات Pump and pipe line
- الجبالات المتنقلة Transit mixers ، سعة الجبالة $4-7 m^3$.
- يجب ألا يزيد ارتفاع الصب على $(1.5-2)m$.



(a) Conveyor belt

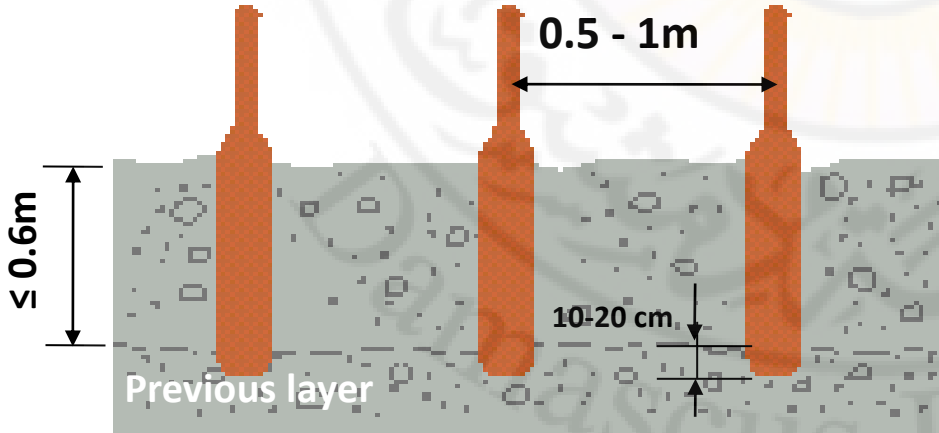


(b) Truck-mounted chute

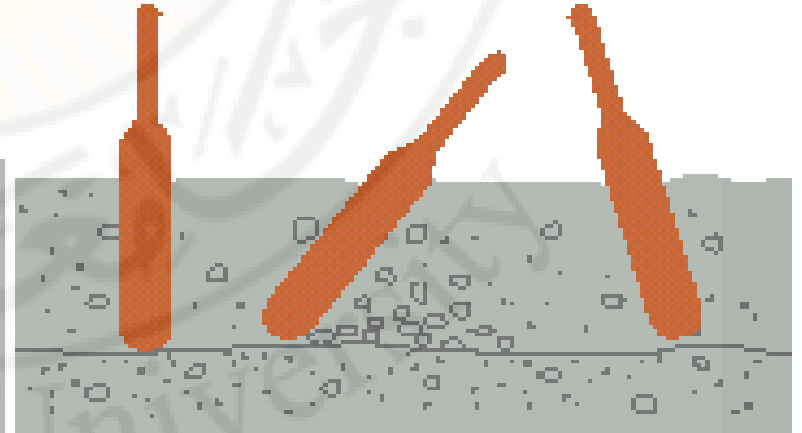
4- الرص (CONSOLIDATION):

- يتم الرص إما بالمطرقة الآلية، أو بالرجاج.
- يجب ألا تزيد سماكة الطبقة المرصوة على 60cm
- يجب أن يدخل الرجاج إلى عمق 10-20cm داخل الطبقة المرصوة مسبقاً.
- يجب ادخال الرجاج في عدة أماكن من الخلطة متباعدة عن بعضها مسافة 0.5-1m، ولمدة تتراوح بين 5-30sec في كل مرة، أفضل من أن يبقى الرجاج في المكان ذاته لفترة طويلة.

Vibration time: 5 – 30 sec



Correct



Incorrect

4- الرص (COMPACTING (CONSOLIDATION):

- هناك رص خارجي يطبق على قوالب الكوفرارج، أو على سطح البلاطة البيتونية.



5- المعالجة (الانضاج): CURING:

- يقصد بها تأمين شروط الحرارة والرطوبة المناسبة لتفاعلات اماهة الاسمنت مع الماء، لاكساب البيتون المقاومة والديمومة المطلوبتين.
- يقدر عمق المنطقة السطحية التي تتأثر بالمعالجة من (20mm) في شروط المعالجة الحرارية، وتصل إلى (50mm) في شروط الجفاف الزائد.

6- فك وإزالة قوالب الكوفراج

تتوقف المدة بين صب الخرسانة وفك قوالب الكوفراج على:
درجة حرارة الجو – طول العنصر الانشائي – نوع الاسمنت المستخدم – أسلوب
المعالجة – الحمل الذي سيتعرض له المنشأ بعد فك القوالب.
الشروط الواجب توافرها بعد فك القوالب:
ألا ينتج عن الفك حدوث أية تشققات أو تشوهات غير مسموح بها، ويجب مراعاة ألا
تتعرض الخرسانة للاهتزازات أو الصدمات أثناء الفك

جوانب الجوائز والأعمدة
المعرضة لضغط محوري فقط
والجدران الخارجية

- لا يتم الفك قبل:
- 24 ساعة من الصب

الجوائز والبلاطات

- لا يتم الفك قبل:
- 2 * (طول الجائز أو البعد الأصغر للبلاطة)
- + 2 يوم، بحيث لا تقل المدة عن أسبوع.

الأظفار

- لا يتم الفك قبل:
- 4 * طول الظفر بالمتر + 2 يوم.
- ولا تقل المدة عن أسبوع

6- فك وإزالة قوالب الكوفراج

الجوائز والبلاطات باستخدام
اسمنت سريع التصلب

- يتم الفك بعد:
- نصف المدة المحددة للأسمنت البورتلاندي العادي.
وفي حالة الوصول للمقاومة مبكراً
- يمكن تخفيض المدة بشرط ألا تقل عن 3 أيام

بالنسبة لحالة انخفاض درجات
الحرارة تحت 15°C

- يجب الحذر وتأجيل فك القوالب مدة مناسبة، بالإضافة
إلى المدة المشار إليها.

بالنسبة للقوالب والركائز الحاملة
لأحمال إضافية كما في حالة الطابق
الذي يحمل وزن الطابق التالي
حديث الصب

- يتم الفك:
- بعد انقضاء 28 يوم، مع اتخاذ كافة الاحتياطات
التي تضمن ارتكاز القوائم على أرضية تتحمل
الأثقال عليها بأمان، وبعد التأكد من مقاومة
الخرسانة بعمر 28 يوم أنها تحقق اشتراطات
المشروع.

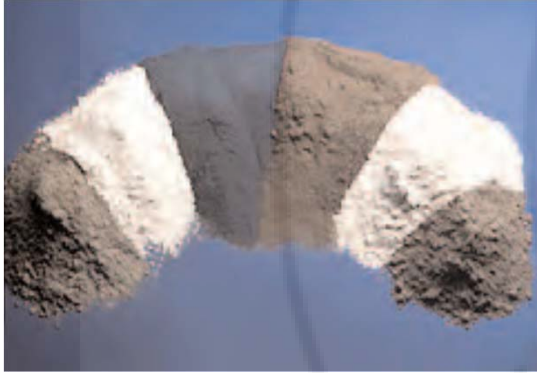
الإضافات ضمن الخلطات الخرسانية

تُقسم الإضافات ضمن الخرسانة الى قسمين: الأول يُسمى الإضافات المينيرالية (الاسمنتية) و الثاني يُسمى الإضافات الكيميائية (الخرسانية).

١-الإضافات المينيرالية (الاسمنتية)

تُضاف هذه المواد الى الخلطة الخرسانية كجزء من نظام الربط الكلي ضمنها بهدف تحسين خواص محددة للخرسانة. مثال: مقاومة التفاعل القلوي السيليسي.

تشمل هذه الإضافات المواد التالية:(انظر الشكل جانبا من اليسار الى اليمين)



• الرماد المتطاير (النوع C) ، Fly ash, cendres volantes (class C)

• ميتاكاولين (الغضار المحروق) Metakaolen, métakaolin

• هباب السيليس Silica fume, fumée de silice

• الرماد المتطاير (النوع F)

• خبث الافران العالية الحبيبي المطحون Ground granulated blast furnace slag, laitier de haut fourneau granulé broyé

• الطين المشوي Calcined shale, schiste calciné

تُصنف أغلب هذه الإضافات كمواد بوزولانية (الرماد المتطاير، هباب السيليس، البوزولانا الطبيعية) و بعضها يملك خواص هيدروليكية -بوزولانية (خبث الافران العالية).

المادة البوزولانية: هي مادة سيليسية أو ألومنية سيليسية، مطحونة بشكل ناعم. بوجود الرطوبة تتفاعل هذه المادة مع هيدروكسيد الكالسيوم CH الناتجة عن اماهة الاسمنت البورتلندي ليشكل مواد ربط من أهمها سيليكات الكالسيوم المائية C-S-H .

يمكن لهذه المواد ان تُستخدم كمواد مضافة للإسمنت البورتلندي او كمواد استبدال جزئي له و ذلك وفقا للتأثير المطلوب من هذه المواد.

تُحدد النسبة المثلى لاستخدام هذه المواد تجريبيا، حيث ان التجارب تحقق هدفين:

١. تبين اذا ما كانت الإضافة فعالة في تحقيق الهدف المطلوب.
٢. إيجاد النسب الصحيحة لاستخدام هذه المواد، حيث ان استخدام نسبة اعلى او اقل من النسبة المثلى يؤدي الى عدم تحقيق الهدف المطلوب.

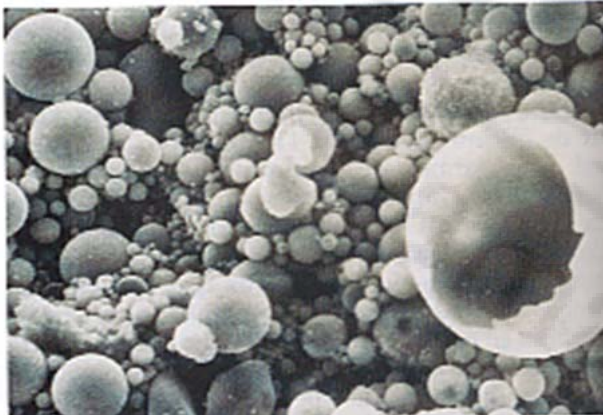
تقليديا يتم استخدام هذه المواد بشكل افرادي ضمن الخرسانة ، إلا انه في الوقت الحاضر و بفضل التعرف بشكل كبير و جيد على خواص هذه المواد، يمكن مزج نوعين (مادتين) من هذه الاضافات أو اكثر لإنتاج خرسانة بمواصفات محددة.

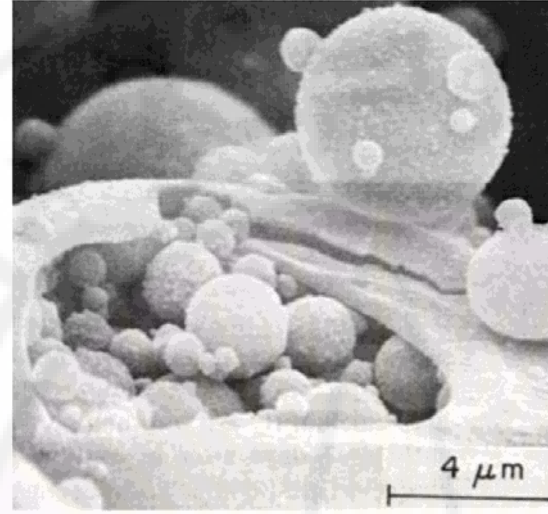
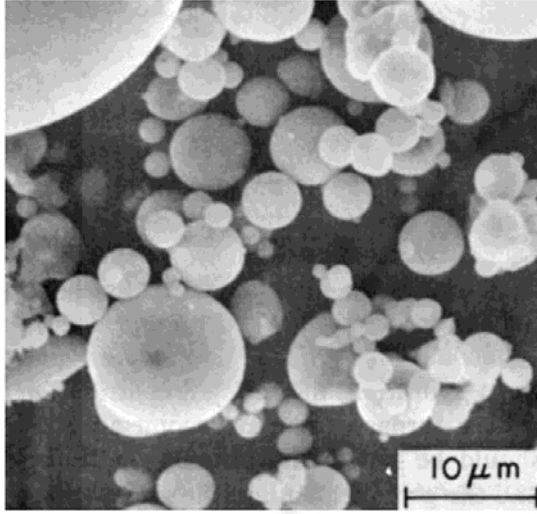
١-١- الرماد الطائر (Cendres volantes – Fly ash) :



يُعتبر الرماد الطائر الإضافة الأكثر استخداما في الخرسانة و هو عبارة عن منتج ثانوي (يقايا ناعمة جداً) لاحتراق الفحم الحجري المسحوق و المستخدم في محطات توليد الطاقة الكهربائية. تنصهر شوائب الفحم الحجري (الغضار، الفدسبار، الكوارتز، الطين) اثناء عملية الاحتراق مشكلة معلق يتم حمله بعيداً عن غرف الاحتراق بواسطة الغازات المنبعثة (غازات الانفلات) ثم تبريده و تصلبه على شكل حبيبات كروية زجاجية تُسمى الرماد المتطاير. بعدئذ يتم جمع هذه الحبيبات باستخدام أكياس الترشيح، او طريقة الترسيب الساكن.

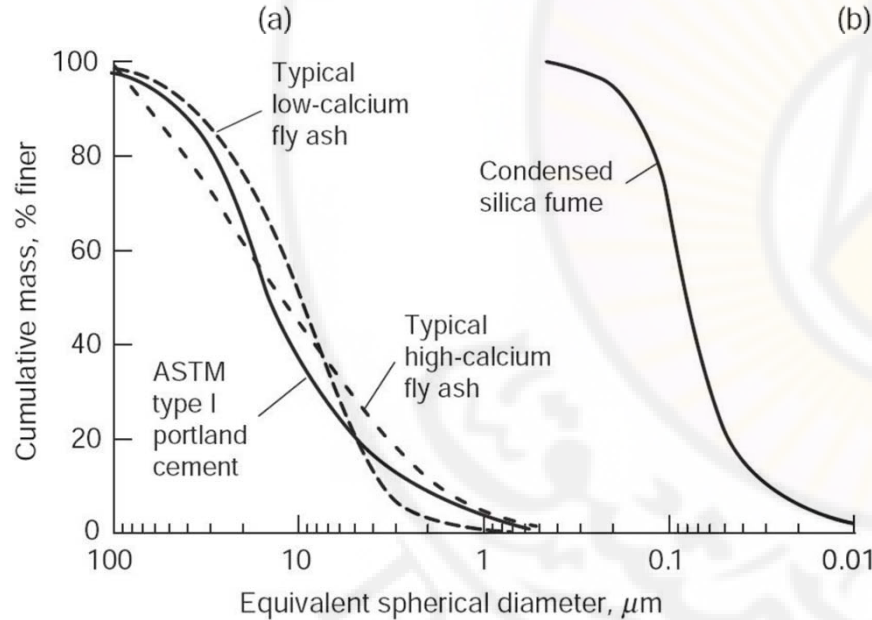
في النهاية يكون الرماد المتطاير عبارة عن بودرة شبيهة بالإسمنت البورتلندي، معظم ذراتها عبارة عن حبيبات صلبة، كروية الشكل، كما انه يمكن ان تتواجد بعض الكريات الجوفاء و بعضها الاخر عبارة عن كريات تحوي داخلها كريات صغيرة.





تتراوح ابعاد ذرات الرماد المتطاير بين (1-100) μm مع بعد نموذجي لمعظم الذرات اقل من 20 μm . تتراوح نسبة الذرات الأكبر من 45 μm بين (10-30)% .

السطح النوعي النموذجي للرماد يتراوح بشكل عام ما بين (300-500 m^2/kg) بالرغم من انه في بعض الأحيان يمكن ان يكون السطح النوعي منخفضا يعادل 200 m^2/kg أو مرتفعاً يعادل 700 m^2/kg و وزنه النوعي تتراوح بين (1.9-2.8)



الوزن الحجمي للرماد الطائر المرصوص بشكل سيء (متضمناً الفراغات) يتراوح بين (540-860) kg/m^3 . الوزن الحجمي للرماد الطائر المرصوص بشكل جيد بالاهتزاز (متضمناً الفراغات) يتراوح بين (1120-1500) kg/m^3 .

يُعتبر الرماد الطائر مادة رخيصة جداً و هو يتألف بشكل خاص من سيليكات المتزججة الحاوية على أكسيد السيليوس، أكسيد الألمنيوم، أكسيد الحديد و أكسيد الكالسيوم و يحتوي كمركبات أقلية أكسيد المغنيزيوم، الكبريت، الصوديوم، البوتاسيوم، الكربون. لون الرماد الطائر بيج او رمادي.

تُصنف المواصفة ASTM C618 الرماد المتطاير بنوعية C و F ، (Class F and Class C) ، كإضافة بوزولانية مستخدمة في الخرسانة.

- يحتوي النوع F على نسبة منخفضة من أكسيد الكالسيوم (اقل من 10%) و نسبة من الكربون اقل من 5% . و يستخدم بنسبة تتراوح بين (15-25%) من المادة الاسمنتية الكلية.
 - يحتوي النوع C على نسبة مرتفعة من أكسيد الكالسيوم (10-30%) و نسبة من الكربون اقل من 2% . و يستخدم بنسبة تتراوح بين (15-40%) من المادة الاسمنتية الكلية.
- تتغير نسبة الاستخدام وفقا لفعالية الرماد و للتأثيرات المرغوبة ضمن الخرسانة.

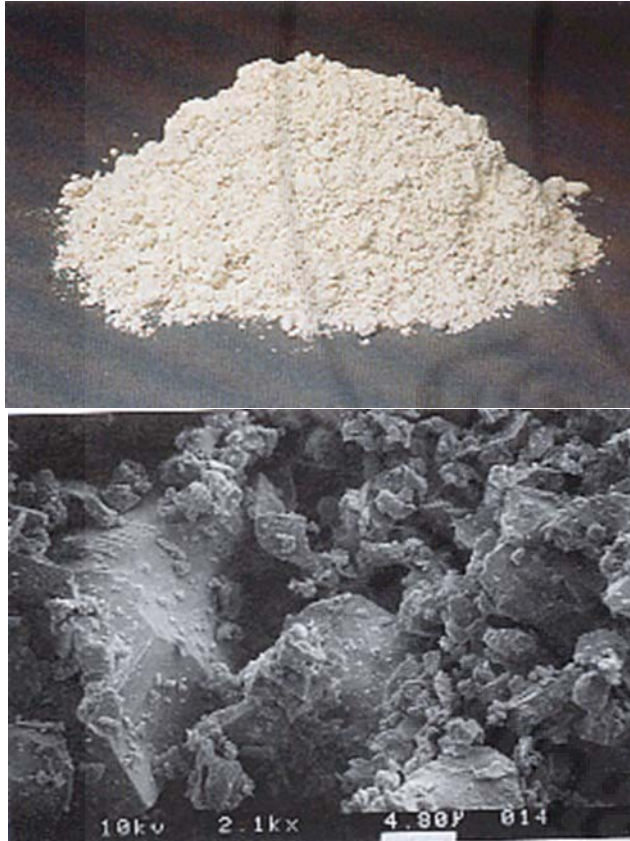
٢-١ الخبث (Laitier -Slag) :

يبين الشكل جانبا صورة للخبث و يسمى ايضا اسمنت الخبث الناتج صهر الحديد ضمن الافران. هو عبارة عن رابط مائي يتألف بشكل اساسي من سيليكات و الومينات الكالسيوم و التي تتشكل ضمن ظروف الانصهار للحديد في الافران العالية . تم تطوير هذه المادة في المانيا عام 1853 و من ثم بدا استخدامها كمادة اسمنتية منذ العام 1900 .

يتم تبريد الخبث المنصهر بدرجة حرارة 1500°C بشكل سريع ضمن الماء لتتشكل مادة حصوية تشبه الرمل الزجاجي، بعد ذلك يتم طحنها الى حبيبات بأبعاد اقل من $45\mu\text{m}$.

الوزن النوعي للمادة المطحونة تتراوح بين (2.85-2.95) و وزنها الحجمي يتراوح بين $(1050-1375)\text{kg/m}^3$ و سطحها النوعي (400-600) m^2/kg . تتميز حبيبات الخبث بالسطح الخشن و الحواف الحادة بوجود الماء و المادة المنشطة وهي NaOH أو CaOH اللذين نحصل عليهما من الاسمنت البورتلندي.

ملاحظة: لا يملك الخبث المبرد بالهواء الخواص المائية التي يملكها الخبث المبرد بالماء.



تتراوح نسبة استخدام الخبث ضمن الخرسانة العادية بين (30-45%) من المادة الاسمنتية . وصلت نسبة استخدام الخبث في بعض الخلطات حتى 70% من المادة الاسمنتية.

تُصنف المواصفة ASTM C989 الخبث وفقاً لفعاليتها الى ثلاثة اصناف:

١. الصنف 80 (Grade 80)

٢. الصنف 100 (Grade 100)

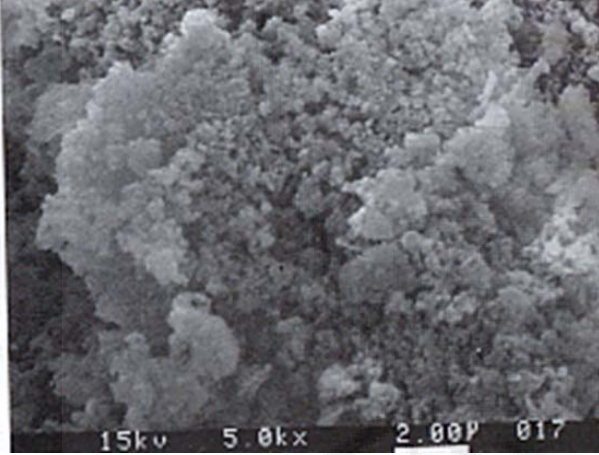
٣. الصنف 120 (Grade 120)

تعريف دليل فعالية الخبث: هو النسبة المئوية لحاصل قسمة مقاومة الضغط لعينات من المونة الاسمنتية المصنوعة بنسبة 50% من الاسمنت البورتلندي و 50% من الخبث الى مقاومة الضغط لعينات من المونة المصنوعة من الاسمنت البورتلندي بنسبة 100% و ذلك بعمر 7 أيام و عمر 28 يوماً

دليل الفعالية % على عمر 7 أيام لا يقل عن ..		دليل الفعالية % على عمر 28 يوم لا يقل عن...		الصنف
لأي عينة عشوائية	متوسط خمس عينات متتالية على الاقل	لأي عينة عشوائية	متوسط خمس عينات متتالية على الاقل	
-	-	70	75	80
70	75	90	95	100
90	95	110	115	120

١-٣- هباب السيليس (Fumée de silice- Silica fume) :

هباب السيليس او المايكروسيليس او هباب السيليس المكثف عبارة عن منتج ثانوي ينتج من ارجاع الكوارتز العالي النقاء بالفحم ضمن فرن القوس الكهربائي عند صناعة السيليكون. ينطلق هباب السيليس على شكل بخار مؤكسد من الفرن الذي درجة حرارته 2000°C ، ثم يتم تبريده فيتكاثف لتتم عملية جمعه ضمن أكياس قماشية كبيرة. أخيرا تتم إزالة الشوائب منه و التحكم بأبعاد ذراته. يُصنف الهباب كمادة بوزولانية.



يتألف هباب السيليس المكثف بشكل أساسي من السيليكا (SiO_2) (نسبته أكثر من 85%) ، هلامي، غير متبلور . شكل ذراته كروية، ناعمة جداً ، اقطارها أقل من $1\mu\text{m}$ (القطر الوسطي للذرات $0.1\mu\text{m}$ و هو أقل من القطر الوسطي لذرات الاسمنت ب 100 مرة)، السطح النوعي للهباب حوالي $20000\text{m}^2/\text{kg}$ ، وزنه النوعي يتراوح بين 2.20-2.5 ، وزنه الحجمي يتراوح بين $130-430\text{kg}/\text{m}^3$ ، من باب المقارنة فقط السطح النوعي لدخان التبغ يبلغ $10000\text{m}^2/\text{kg}$.

يُباع هباب السيليس صلبا على شكل بودرة و يمكن ان يتوافر على شكل سائل. نسبة استخدامه ضمن الخلطات الخرسانية تتراوح بين (5-10%) من الوزن الكلي للمادة الاسمنتية . يُستخدم في المنشآت التي تتطلب مقاومة عالية بالضغط والتي تتطلب كتامة كبيرة.

١-٤- البوزولانا الطبيعية (Pouzzolanes naturelles- Natural Pozzolans) :

استخدمت البوزولانا الطبيعية منذ آلاف السنين. أما التسمية بوزولانا فهي مشتقة من الرماد البركاني المستخرج من بلدة صغيرة اسمها Pozzouli بجانب مدينة نابولي في إيطاليا عام 79 ميلادي. على أية حال، فإن استخدام الرماد البركاني مع الغضار المشوي كمادة ربط في المنشآت المدنية يعود الى 2000 عام قبل الميلاد و ربما أكثر وفقاً لبعض الثقافات. ماتزال العديد من المنشآت المصرية، الرومانية و اليونانية و التي استخدمت فيها هذه الإضافات كمادة ربط ، ماتزال قائمة حتى الان كشاهد على ديمومة هذه الإضافات.

تُستخدم المواد البوزولانية الطبيعية للحد من ارتفاع درجة حرارة الخرسانة الناتج عن اماهة الاسمنت ولا سيما في المنشآت الكتلية (السدود) و كذلك يمكن استخدامها لمقاومة خطر الكبريتات على الخرسانة.

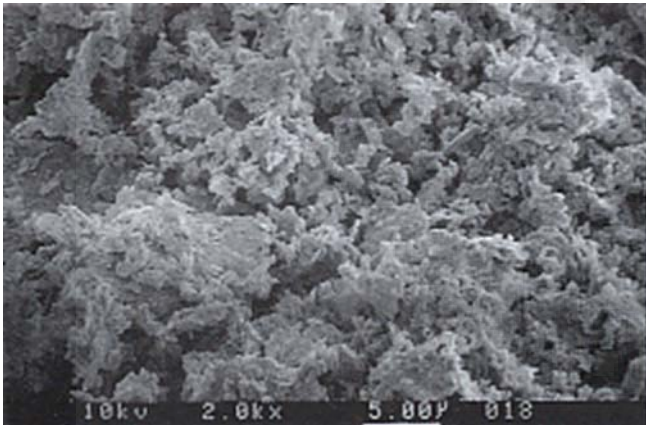
معظم المواد البوزولانية المستخدمة في الوقت الحاضر هي مواد معالجة حرارياً في الفرن و من ثم طحنها الى بودرة ناعمة. تتضمن هذه المواد:

❖ الغضار المشوي Argile calcinée –calcined clay .

❖ شيسيت (الطين) المشوي Schiste calciné-calcined shale .

❖ ميتاكاولين Métakaolin- metakaolin:

الغضار المشوي:



يُعتبر الغضار المشوي المادة الأكثر استخداماً بين المواد البوزولانية الطبيعية ضمن الخلطات الخرسانية، حيث يُستخدم بنسبة استبدال للاسمنت البورتلندي تتراوح بين (15-35) % . يساهم الغضار ضمن الخلطات الخرسانية في مقاومة خطر الكبريتات و يحد من التفاعل القلوي-السيليسي كما انه يخفف نفوذية الخرسانة.

Calcined clay



يتراوح الوزن النوعي للغضار بين (2.4-2.61) ،
نعمته تتراوح بين (650-1350)m²/kg .

الطين المشوي:

يمكن ان يحتوي نسبة من الكلس
تتراوح بين (5-10)%، الذي يجعله
يملك بعض الخواص الهيدروليكية .

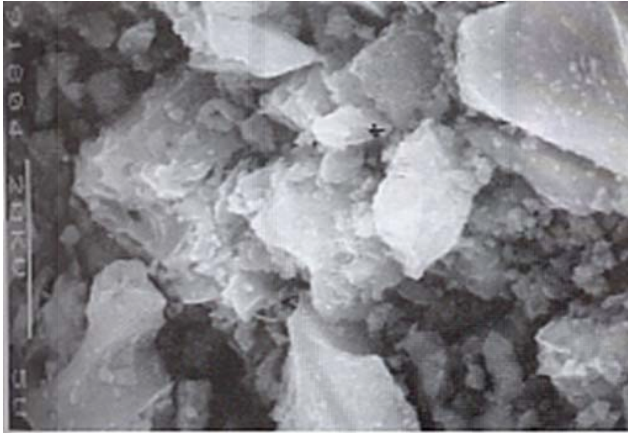


Figure 9.2.8: Calcined shale



الميتاكاولين:

هو نوع خاص من الغضار المشوي و يتم انتاجه من kaolin النقي
جداً و المشوي بدرجة حرارة مخفضة و من ثم طحنه الى ابعاد تتراوح
بين (1-2)µm . يتم استخدامه في تطبيقات خاصة عند الحاجة
لمقاومة عالية جداً و نفوذية قليلة للخلطات الخرسانية. عادة يُستخدم
كمادة إضافة وليس كمادة استبدال بنسبة معينة لاسمنت البورتلندي.
نسبة اضافة لاسمنت البورتلندي تعادل 10% من كمية الاسمنت.



١-٥- التركيب الكميائي للاضافات الاسمنتية:

	Class F fly ash الرماد المتطاير النوع F	Class C fly ash الرماد المتطاير النوع C	Ground slag الخبث	Silica fume هباب السيليس	Calcined clay الغضار المشوي	Calcined shale الوحد المشوي	Metak- aoline الميتاكاولين
SiO ₂ , %	52	35	35	90	58	50	53
Al ₂ O ₃ , %	23	18	12	0.4	29	20	43
Fe ₂ O ₃ , %	11	6	1	0.4	4	0.8	0.5
CaO, %	5	21	40	1.6	1	8	0.1
SO ₃ , %	0.8	4.1	9	0.4	0.5	0.4	0.1
Na ₂ O, %	1.0	5.8	0.3	0.5	0.2	-	0.05
K ₂ O, %	2.0	0.7	0.4	2.2	2	-	0.4
نعومة بلين m ² /kg	420	420	400	20000	990	730	19000
الوزن النوعي	2.38	2.65	2.24	2.4	2.5	2.63	2.5

٦-١- تصنيف الإضافات الاسمنتية وفقا لفعاليتها البوزولانية:

المادة	الفعالية البوزولانية
خبث الافران العالية الحبيبي المطحون- الرماد المتطاير الحاوي نسبة عالية من الكلس (النوع C)	مواد هيدروليكية و بوزولانية في نفس الوقت
هاب السيليس المكثف، غبار قشور الرز	مواد ذات فعالية بوزولانية عالية
الرماد المتطاير الحاوي نسبة منخفضة من الكلس (النوع F) - المواد البوزولانية الطبيعية	مواد ذات فعالية بوزولانية عادية
خبث الافران العالية المبرد ببطء (التبريد بالهواء)، رماد قشور الرز المحروق	مواد ذات فعالية بوزولانية منخفضة

١-٧- تأثير الاضافات الاسمنتية على خواص الخرسانة الطرية :

يختلف تأثير هذه الاضافات على الخرسانة الطرية باختلاف المادة المستخدمة. يتم الحصول على هذا التأثير عن طريق اضافة هذه المواد بشكل منفصل ضمن الخلطة الخرسانية أو باستخدام اسمنت مسبق التحضير (التصنيع) حاوياً على هذه الاضافات.

١-١-٧ تأثير الاضافات الاسمنتية على الحاجة للماء :

- تحتاج الخلطات الحاوية على الرماد الطائر الى كمية ماء اقل من الخلطات العادية غير الحاوية على الرماد و ذلك من اجل قيمة هبوط محددة. تتراوح نسبة التخفيض للماء بين $(1-10)\%$ حيث تزداد نسبة التخفيض كلما زادت نسبة الخلط. هذا التأثير مشابه لتأثير اضافة الخبث ضمن الخلطات الخرسانية.
- تزداد الحاجة الى الماء ضمن الخلطات الخرسانية الحاوية على هباب السيليس بازدياد نسبة الإضافة (الهباب) حتى لو تم إضافة الملدنات للخلطة الخرسانية
- يمتلك الغضار المشوي و الوحل المشوي تأثيراً ضئيلاً على الحاجة للماء في الخلطات الخرسانية.

١-٧-٢ تأثير الاضافات الاسمنتية على قابلية التشغيل:

- بشكل عام، يحسن الرماد المتطاير، الخبث، الغضار المشوي، الطين المشوي قابلية تشغيل الخلطات الخرسانية ذات الهبوط المتماثل.
- أما هباب السيليس فان اضافته تؤدي الى تماسك الخلطة، لذلك لا بد من استخدام الملدنات للمحافظة على قابلية التشغيل المطلوبة و لإنجاز عمليتي الرص و الانهاء للخلطة بشكل صحيح.

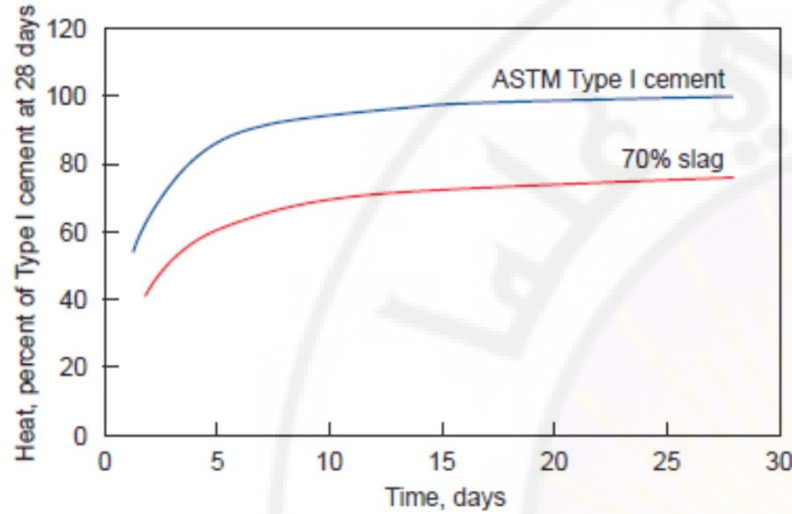
٧-١-٣ تأثير الإضافات الاسمنتية على النضج و الانفصال:

- تبدي الخلطات الخرسانية الحاوية على الرماد المتطاير ميلاً للتقليل من النضج و الانفصال مقارنة بالخلطات العادية. هذا الامر يجعل من استخدام الرماد المتطاير ذو فائدة عملية في الخلطات التي تعاني نقصاً في الحصويات الناعمة. يمكن ان يُعزى انخفاض النضج الى انخفاض كمية الماء في الخلطات الحاوية على الرماد المتطاير.
- تبدي الخلطات الحاوية على الخبث ذو النعومة المماثلة لنعومة الاسمنت البورتلندي زيادة في نسبة و كمية النضج مقارنة بالخلطات العادية، بالمقابل لا يوجد تأثير سلبي على الانفصال. أما اذا كانت نعومة الخبث أكبر من نعومة الاسمنت البورتلندي فانه يخفض النضج.
- يُعتبر هباب السيليس فعال جداً في تخفيض النضج و الانفصال و بالتالي إمكانية استخدام خلطات ذات هبوط عالي دون خطر حدوث الانفصال و النضج.
- لا يُظهر الغضار المشوي، الطين المشوي، و الميتاكاولين تأثيراً واضحاً على النضج.

٧-١-٤ تأثير الإضافات الاسمنتية على محتوى الهواء:

- ان كمية مولدات الفقاعات الهوائية التي نحتاجها لتأمين نسبة محددة من الهواء ضمن الخلطات الخرسانية، تزداد عند استخدام الرماد المتطاير ضمن الخلطة .
- بالمقابل فان تأثير الخبث على نسبة مولدات الفقاعات ضمن الخلطات الخرسانية هو تأثير متغير.
- يمتلك هباب السيليس تأثيراً واضحاً على نسبة مولدات الفقاعات ضمن الخلطات حيث أنه كلما زادت نسبة الهباب في الخلطات تزداد نسبة المولدات.
- يؤدي استخدام الرماد المتطاير و هباب السيليس في الخلطات الخرسانية غير الحاوية على مولدات الفقاعات الهوائية، الى تقليل نسبة الهواء المحجوز ضمن الخلطة.

٧-١-٥ تأثير الإضافات الاسمنتية على حرارة الاماهة:



- ان حرارة اماهة كل من الرماد المتطاير، البوزولانا الطبيعية، و الخبث اقل من حرارة اماهة الاسمنت البورتلندي، و بالتالي فان استخدام هذه الإضافات ضمن الخلطات الخرسانية سيؤدي الى تقليل حرارة الاماهة، و لهذا الامر فائدة كبيرة و لاسيما في المنشآت الكتلية.

ملاحظة: بعض أنواع البوزولانا تمتلك حرارة اماهة تعادل 40% من حرارة اماهة الاسمنت البورتلندي.

- يحرق الغضار المشوي حرارة اماهة مشابهة لحرارة اماهة الاسمنت البورتلندي.

٧-١-٦ تأثير الإضافات الاسمنتية على أزمدة الاخذ:

- يؤدي استخدام الرماد المتطاير، و الخبث الى تأخير أزمدة الاخذ. تعتمد درجة التأخير على عدة عوامل منها: كمية الاسمنت البورتلندي، متطلبات الماء، نوع الإضافة، نسبة الإضافة، حرارة الخرسانة. تُعتبر عملية التأخير في ازمدة الاخذ ذات فائدة في اثناء الصب في الطقس الحار حيث تتيح مزيدا من الوقت لصب و انتهاء الخرسانة. اما في الطقس البارد فان عملية التأخير في الاخذ غير مرغوبة و يتم التغلب عليها من خلال استخدام مسرعات الاخذ لانقاص ازمدة الاخذ.
- يمتلك الغضار المشوي و الغضار المشوي تأثيرا قليلاً على أزمدة الاخذ

٧-١-٧ تأثير الإضافات الاسمنتية على عملية الانهاء:

- عملية الانهاء للخرسانة الطرية الحاوية على الإضافات الاسمنتية مشابهة او افضل من عملية الانهاء للخرسانة العادية غير الحاوية على الإضافات.
- استخدام نسبة عالية من هباب السيليس يجل الخلطة اكثر تماسكا و يُصعب عمية الانهاء للخلطة

٧-١-٨ تأثير الإضافات الاسمنتية على عملية الضخ:

- بشكل عام، يساعد استخدام الإضافات الاسمنتية ضمن الخلطات الخرسانية على عملية الضخ بشكل صحيح دون حدوث انفصال. يُعتبر هباب السيليس الأكثر فعالية في هذا المجال.

٧-١-٩ تأثير الإضافات الاسمنتية على تشققات الانكماش اللدن:

- بما ان الخلطات الخرسانية الحاوية على هباب السيليس ذات نضح قليل، فانها معرضة لزيادة خطر الانكماش اللدن. هذه المشكلة يمكن حلها من خلال تأمين الحماية للخرسانة من الجفاف اثناء عملية الانهاء و بعدها.
- بقية الإضافات البوزولانية و الخبث لها تأثير قليل على تشققات الانكماش اللدن.

٧-١-١٠ تأثير الإضافات الاسمنتية على الانضاج:

- تأثير درجة حرارة الوسط و رطوبته على تصلب و تطور مقاومة الخلطات الخرسانية الحاوية على الإضافات الاسمنتية مشابه لتاثيرها على الخلطات الحاوية على الاسمنت البورتلندي فقط.
- تُعتبر مدة سبعة أيام من الانضاج الصحيح كافية لانضاج الخلطات الخرسانية الحاوية على إضافات خرسانية بنسب عادية.
- كما في حالة الاسمنت البورتلندي، فان انخفاض درجة حرارة الانضاج، يؤدي الى تأخير تطور المقاومة للخلطات الحاوية على الإضافات

٨-١- تأثير الإضافات الاسمنتية على خواص الخرسانة المتصلبة:

٨-١-١ تأثير الإضافات الاسمنتية على المقاومة:

- تساهم الإضافات الاسمنتية في تطور مقاومة الخرسانة حيث يمكن ان تكون المقاومة اكبر او اقل من مقاومة الخلطات الحاوية على الاسمنت البورتلندي فقط كمادة ربط.
- بما ان التفاعل البوزولاني هو تفاعل بطيء فان فترة انضاج الخرسانة هي أطول من الفترة المعتادة للخلطات الحاوية فقط الاسمنت البورتلندي. على اية حال، فان الخلطات الخرسانية الحاوية على هباب السيليس تساهم بتطور المقاومة للخرسانة بشكل أساسي بين عمري 3 أيام و 28 يوما حيث تكون المقاومة للخرسانة اكبر من مقاومة الخرسانة الحاوية على الاسمنت البورتلندي فقط.
- تطور مقاومة الخرسانة الحاوية على الرماد المتطاير، الخبث، الطين المشوي، الغضار المشوي مماثل لتطور مقاومة الخرسانة الحاوية عندما تتم عملية الانضاج في درجة حرارة 23°C . مقاومة الخرسانة الحاوية على الرماد المتطاير العالي الفعالية (النوع C) تكون مماثلة او تزيد عن مقاومة الخرسانة الحاوية على الاسمنت البورتلندي على عمر 28 يوما. بالمقابل بعض الخلطات الحاوية على البوزولانا الطبيعية او الرماد المنخفض الفعالية تحتاج 90 يوما للوصول الى مقاومة الخرسانة العادية على عمر 28 يوماً.
- يمكن زيادة تطور المقاومة الابتدائية بإحدى الطرق التالية:
 - زيادة كمية المواد الرابطة الاسمنتية ضمن الخلطة
 - إضافة مواد اسمنتية ذات مقاومة ابتدائية عالية
 - بتخفيض نسبة الماء الى المواد الاسمنتية
 - بزيادة درجة حرارة الانضاج
 - باستخدام الإضافات الكيميائية (مسرعات الاخذ)

- ان تطور المقاومة البطيء للخلطات الخرسانية الحاوية على بعض أنواع البوزولانا يُعد امراً إيجابياً في حالة الخرسانة الكتلية حيث ان المنشآت الكتلية لا تُوضع بالخدمة الكلية مباشرة، كما أن هذا التطور البطيء للمقاومة يُعتبر أمراً مفيداً عند الصب في الأوقات الحارة حيث تُمنح الخرسانة مزيداً من الوقت لإتمام عملية الصب و القيام بعملية الانهاء و التسوية للسطح.
- تُعتبر الإضافات الاسمنتية أساسية في الحصول على الخرسانة عالية المقاومة، فمثلاً تم استخدام الرماد المتطاير لانتاج خلطات خرسانية وصلت مقاومتها الى 100MPa . في الوقت الحاضر فان استخدام هباب السيليس و الملدنات العالية الفعالية جعل من الممكن انتاج خرسانة جاهزة بمقاومة يمكن ان تصل الى 140MPa .

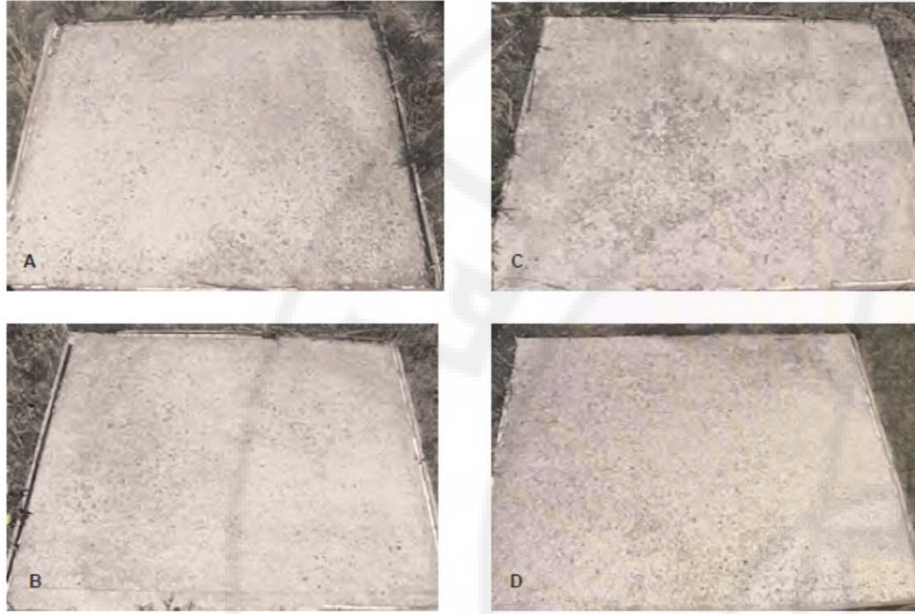
٨-١-٢ تأثير الإضافات الاسمنتية على مقاومة الصدم و مقاومة التآكل بالاحتكاك:

- ترتبط مقاومة الخرسانة للصدم و للتآكل بالاحتكاك بمقاومة الخرسانة بالضغط و كذلك بنوع الحصويات المستخدمة. لا تؤثر الإضافات الاسمنتية على هذه الخواص ابعد من تأثيرها على المقاومة. فمثلاً عند استخدام الرماد المتطاير في الخلطات الخرسانية تبين ان المقاومة للتآكل بالاحتكاك مماثلة لمقاومة الخلطات الحاوية على الاسمنت البورتلندي فقط.

٨-١-٣ تأثير الإضافات الاسمنتية على مقاومة التجمد و الذوبان:

- يتطلب تطوير مقاومة الخرسانة لدورات التجمد و الذوبان ان تكون ذات مقاومة بالضغط كافية و ان تكون حاوية على نسبة من الفراغات الهوائية المدخلة كافية ايضاً.
- للحصول على نفس مقاومة التجمد و الذوبان للخلطات الحاوية على الإضافات الاسمنتية و الخلطات الحاوية فقط على الاسمنت البورتلندي، يجب تحقيق الشروط الأربعة التالية:

- ان يكون لكلا النوعين من الخلطات المقاومة نفسها بالضغط
- ان يحتوي كل منهما نسبة كافية من الفقاعات الهوائية المدخلة ذات المواصفات الصحيحة.



- ان تتم عملية الانضاج بشكل صحيح.
- ان تتم عملية تجفيفهما في الهواء لمدة شهر قبل البدء بتعريضهما لدورات التجمد و الذوبان.

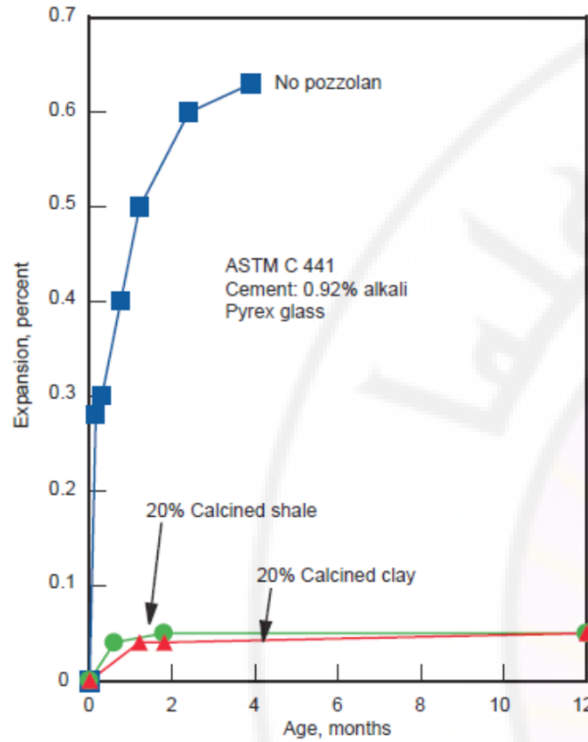
• في الشكل جانباً اربع بلاطات خرسانية، الأولى (A) تحتوي على الرماد المتطاير، و الثانية (B) تحتوي على الخبث و الثالثة (C) تحتوي على الطين المحروق و الرابعة (D) تحتوي على الاسمنت البورتلندي فقط. تعرضت هذه البلاطات و لمدة ثلاثون عاما للصقيع. من خلال الصور نجد ان جميع العينات ذات ديمومة جيدة ضد دورات التجمد و الذوبان.

٨-١-٤ تأثير الإضافات الاسمنتية على ظاهرتي الانكماش والزحف:

- عند استخدام كميات قليلة أو متوسطة من الرماد المتطاير ، الخبث، الطين المشوي، الغضار المشوي وهباب السيليس فان تأثيرها على الانكماش و الزحف في الخرسانة يكون بشكل عام قليل وغير مؤثر من الناحية العملية.
- بعض الدراسات تُظهر بان هباب السيليس يمكن ان يؤدي الى انخفاض الزحف

٨-١-٥ تأثير الإضافات الاسمنتية على النفوذية و الامتصاص:

- عند الانضاج الصحيح للخرسانة، فان استخدام الرماد الطائر، الخبث، البوزولانا الطبيعية يخفض نفوذية الخرسانة و امتصاصها. يُعد هباب السيليس و الميتاكاولين الأكثر فعالية من بين الإضافات الاسمنتية في هذا المجال.



٨-١-٦ تأثير الإضافات الاسمنتية على التفاعل القلوي السيليسي:

• يمكن التحكم بالتفاعل القلوي السيليسي عن طريق استخدام الإضافات الاسمنتية (هباب السيليس، الخبث، الغضار المشوي، الطين المشوي)، حيث تقوم هذه الإضافات بتخفيض خطر هذا التفاعل بنسبة كبيرة. يبين الشكل جانباً تأثير الغضار المشوي، و الطين المشوي على تخفيض نسبة لانتفاخ الناتجة عن التفاعل القلوي السيليسي

• ان تحديد نسبة الاستبدال المثلى للإضافات الاسمنتية امر مهم جداً بهدف الوصول الى نسبة التخفيض العظمى لخطر التفاعل القلوي السيليسي.

ملاحظة: الإضافات الاسمنتية التي تُخفض من خطر التفاعل القلوي السيليسي لا تقلل من خطر التفاعل القلوي الكربوني.

٨-١-٧ تأثير الإضافات الاسمنتية على مقاومة الكبريتات:

• يمكن للإضافات الاسمنتية (هباب السيليس، الرماد المتطاير، الخبث، الطين المشوي) اذا ما استُخدمت بالنسب الصحيحة ان تحسن مقاومة الخرسانة للكبريتات و خطر مياه البحر، وهذا يعود لقدرتها على تقليل نفوذية الخرسانة و تقليل كمية العناصر الفعالة ضمن الخلطة (الكلس مثلاً الذي نحتاجه لتفاعلات الكبريتات المسببة للانتفاخ)

• تُعتبر الخلطات الحاوية على الرماد من النوع (F) اكثر مقاومة للكبريتات من الخلطات الحاوية على النوع (C) .

• بشكل عام، يُعتبر الخبث مفيد في البيانات الحاوية على الكبريتات، حيث أظهرت بعض الدراسات ان الخلطات الخرسانية الحاوية على الخبث ذات مقاومة للكبريتات تعادل او أكبر من مقاومة الخلطات الحاوية على الاسمنت البورتلندي المقاوم للكبريتات (Type V) . هذه الأمر ينطبق على الغضار المشوي.

٨-١-٧ تأثير الإضافات الاسمنتية على تآكل حديد التسليح:

- تُخفض بعض الإضافات الاسمنتية تآكل حديد التسليح عن طريق تقليل نفوذية الخرسانة المنضجة بشكل جيد، لتسرب ذرات الكلور، الماء، الهواء ضمنها.
- لأن هباب السيليس يخفض النفوذية بشكل كبير، فإنه يُستخدم مع الميكاكولين في الخلطات المستخدمة في صب الطبقات العليا من بلاطات الجسور و في مواقف السيارات كونها منشآت معرضة بشكل كبير لتسرب ذرات الكلور.

٨-١-٨ تأثير الإضافات الاسمنتية على الكربنة:

- تحدث كربنة الخرسانة نتيجة تغلغل ثاني أكسيد الكربون الموجود بالهواء ضمن الخرسانة و تفاعله مع هيدروكسيد الكالسيوم ليشكل كربونات الكالسيوم التي تعمل على تخفيض قلوية الخرسانة. إذا علمنا ان القلوية العالية للخرسانة مهمة جدا في حماية فولاذ التسليح من التآكل، فان مقاومة الخرسانة للكربنة مهمة جدا في تجنب تآكل فولاذ التسليح.
- تزداد عملية الكربنة في الخرسانة الحاوية على نسبة ماء/مواد اسمنتية عالية، كمية قليلة من الاسمنت، فترة انضاج قليلة، انخفاض المقاومة، عجينة نفوذة
- عند استخدام الرماد المتطاير بنسب عادية ضمن الخلطات الخرسانية، لوحظ زيادة الكربنة بنسبة بسيطة ليست ذات تأثير كبير على الخرسانة.

٨-١-٩ تأثير الإضافات الاسمنتية على اللون:

- تؤثر الإضافات الاسمنتية بشكل بسيط على لون الخرسانة المتصلبة وهذا يرتبط بلون وكمية الإضافة المستخدمة.
- العديد من الإضافات لونها قريب من لون الاسمنت البورتلندي و بالتالي فان لا تاثير يذكر على لون الخرسانة المتصلبة
- بعض أنواع السيليس يمكن ان تعطي للخرسانة لون رمادي غامق، اما الخبث و الميكاكولين فيمكن ان تعطي للخرسانة لونا فاتحاً

٨- نسب الإضافات الاسمنتية ضمن الخلطة الخرسانية:

- تُحدد النسبة المثلى للإضافات الاسمنتية للاستخدام مع الاسمنت البورتلاندي أو الاسمنت المخلوط وفقا لنتائج الاختبارات، للتكلفة، لتوافر المادة، و وفقا للخواص المطلوبة من الخلطة الخرسانية. تهدف الاختبارات لتحديد العلاقة بين المقاومة و نسبة الماء/ المادة الاسمنتية الكلية. ملاحظة: يجب ان نتذكر ان الوزن النوعي للإضافات الاسمنتية اقل من الوزن النوعي للاسمنت.
- تُحدد نسبة استخدام الإضافات الاسمنتية كنسبة مئوية وزنية من المادة الاسمنتية الكلية.
- يمكن للخلائط الاسمنتية ان تحتوي واحدة أو أكثر من الإضافات الاسمنتية ، فمثلا: يمكن خلطة ان تحتوي اسمنت بورتلاندي و رماد متطاير و هباب السيليس، هكذا خلطات تُسمى بالخلطات الثلاثية (ternary) . في هذه الحالات لا بد من اجراء الاختبارات على الخلطات للتأكد من انها تحقق المتطلبات الخاصة بالمشروع المنفذ.

٩- التخزين:

- في معظم الحالات، فان الرطوبة لا تؤثر على الاداء الفيزيائي للإضافات الاسمنتية، ومع ذلك فان هذه المواد يجب ان تُخزن في أماكن جافة لتجنب صعوبات التفريغ و التعامل اليدوي معها.
- يجب حفظ الرماد المتطاير من النوع (C) و الطين المشوي في أماكن جافة حتى لا تتصلب عند تعرضها للرطوبة .
- المعدات المستخدمة في تخزين هذه الإضافات هي نفسها المستخدمة في تخزين الاسمنت البورتلاندي.
- لأن بعض الإضافات تشبه الاسمنت من حيث اللون و النعومة فانه لا بد من التسجيل عليها الاسم بشكل واضح حت لا يتم استبدالها ب مواد أخرى أو بالاسمنت.

٢- الإضافات الكيميائية (الإضافات الخرسانية)

Chemical admixtures for concrete

Adjuvants du béton

١-٢ مقدمة عامة:

تُعرف الإضافات الكيميائية بأنها كل مادة ما عدا (الاسمنت البورتلندي، ماء الجبل، الحصى، الياف التسليح) تُضاف بكميات صغيرة إلى الخلطة الخرسانية قبل الخلط مباشرة أو أثناء الخلط بهدف إعطاء الخرسانة الطرية أو المتصلبة صفات معينة .

يمكن تلخيص الأهداف الرئيسية لاستخدام الإضافات الكيميائية وفقاً لـ **PCA (Portland Cement Association)** بما يلي:

- ١- تخفيض تكاليف الانشاءات الخرسانية.
 - ٢- تأمين بعض الخواص للخرسانة بفعالية أكثر فيما لو استخدمت طرق أخرى.
 - ٣- المحافظة على نوعية الخرسانة أثناء مراحل الخلط ، النقل، الصب، المعالجة (الانضاج) في ظروف جوية غير مفضلة.
 - ٤- التغلب على بعض الصعوبات أثناء عملية الصب.
- بشكل تفصيلي، فإنه وفقاً للمواصفة **ACI 212-3R** يمكن أن نميز بين تأثير الإضافات على الخلطة الطرية و تأثيرها على الخلطة المتصلبة.

تأثير الإضافات الكيميائية على خواص الخرسانة الطرية: من هذه التأثيرات يمكن ان نذكر:

١. زيادة قابلية التشغيل بدون زيادة كمية الماء، أو تخفيض كمية الماء بدون تغيير قابلية التشغيل.
٢. تخفيض او تسريع زمن الأخذ الأولي
٣. تخفيض او تجنب الهبوط في الخرسانة بعد الصب.
٤. تقليل النضح.
٥. تخفيض خطر الانفصال.
٦. تحسين قابلية الضخ للخرسانة.

تأثير الإضافات الكيميائية على خواص الخرسانة المتصلبة: من هذه التأثيرات يمكن ان نذكر:

١. تخفيض نسبة الحرارة المنتشرة اثناء امالة الاسمنت المبكرة.
٢. تسريع تطور المقاومة في العمر المبكر للخرسانة.
٣. زيادة المقاومة (ضغط، شد، انعطاف)
٤. زيادة مقاومة الخرسانة لدورات التجمد و الذوبان.
٥. تخفيض نفوذية الخرسانة.
٦. تخفيض الانكماش الجاف.
٧. حماية حديد التسليح من الصدأ
٨. انتاج خرسانة ملونة



يوجد العديد من أنواع الإضافات الكيميائية التي يمكن تقسيمها الى عدة مجموعات. تبين الصورة جانبا بعض الإضافات السائلة وهي من اليسار الى اليمين : إضافات ضد الانحلال (انجراف الاسمنت بالماء)، مخفضات الانكماش، مخفضات الماء، العوامل (الصانعات) الرغوية، مانعات الصدأ، مولدات الفقاعات الهوائية سنتعرض فيما اهم مجموعات الإضافات الكيميائية:

٢-٢ الإضافات المخفضة للماء و المتحكمة بأزمة الاخذ:

تعتبر هذه المجموعة من الإضافات الأكثر استخداماً ضمن الخرسانة و تشمل مخفضات الماء بدرجات متفاوتة و التحكم بأزمة الاخذ (تسريع أو تأخير) للخرسانة. وفقاً للمواصفة **ASTM C494** نميز سبعة أنواع من هذه الإضافات:

التسمية باللغة العربية	التسمية باللغة الانكليزية
١- الإضافات المخفضة للماء (النوع A)	1- Type A –water-reducing admixtures
٢- الإضافات المؤخرة للأخذ (النوع B)	2- Type B-retarding admixtures
٣- الإضافات المسرعة للأخذ (النوع C)	3- Type C-acceleration admixtures
٤- الإضافات المخفضة للماء و المؤخرة للأخذ (النوع D)	4- Type D-water-reducing and retarding admixtures
٥- الإضافات المخفضة للماء و المسرعة للأخذ (النوع E)	5- Type E-water- reducing and accelerating admixtures

3- Type F-water-reducing, high range admixtures.	6- الإضافات المخفضة للماء بدرجة عالية (النوع F)
4- Type G-water-reducing, high range and retarding admixtures	٤- الإضافات المخفضة للماء بدرجة عالية و تأخير الأخذ (النوع G)

من قراءة الجدول السابق نجد ان تأثير هذه المجموعة من الإضافات ينحصر بثلاثة بنود:

١. تخفيض الماء (النوعين A,F) حيث يُسمى النوع A بالملدنات (Plasticizers) و النوع F الملدنات العالية الأداء (Superplasticizers)

٢. تأخير الأخذ (النوع B)

٣. تسريع الأخذ (النوع C)

اما النوع D فهم مزيج من النوعين A,B و النوع E مزيج من النوعين A,C و النوع G مزيج من النوعين F,B . سنستعرض تأثير وآلية عمل وتركيب هذه الإضافات في مايلي:

٢-٢-١ الإضافات المخفضة للماء :

الهدف:

١. تخفيض كمية ماء الجبل لإنتاج خرسانة ذات هبوط محدد. مخفضات الماء من النوع (A) تخفض الماء بنسبة تتراوح بين % (5-10) و المخفضات العالية الفعالية تُخفض الماء بنسبة تتراوح بين % (10-30) .

٢. زيادة الهبوط دون زيادة ماء الجبل .

تؤدي عملية تخفيض الماء الى النتائج التالية:

١. تخفيض نسبة W/C

٢. تخفيض كمية الاسمنت.

٣. الحصول على خرسانة ذات مقاومة ابتدائية عالية.

٤. الحصول على خرسانة ذات مقاومة عالية (باستخدام المخفضات العالية الفعالية يمكن الحصول على مقاومة تصل حتى 70MPa .

٥. الحصول على خرسانة عالية الأداء و قليلة النفاذية.

٦. تخفيض النضح و خطر الانفصال ضمن الخرسانة الطرية.

في الشكل جانباً نلاحظ اربع صور :

(a) : خلطة خرسانية بدون اية إضافات مخفضة للماء.

(b) : خلطة خرسانية مع إضافات مخفضة للماء عادية التأثير.

(c) : خلطة خرسانية مع إضافات مخفضة للماء متوسطة التأثير

(d) : خلطة خرسانية مع إضافات مخفضة للماء عالية التأثير



(a)



(b)



(c)

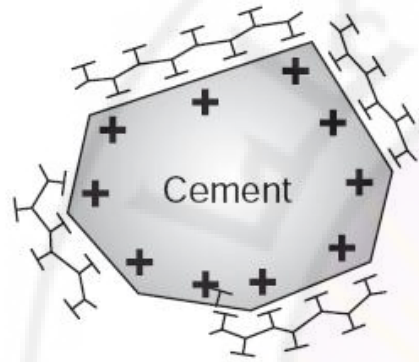


(d)

آلية التأثير:

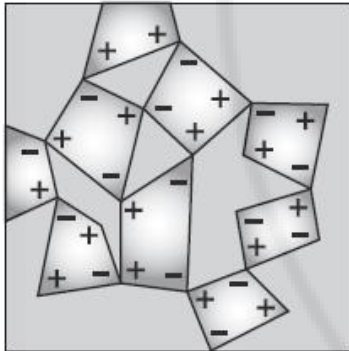


Molecule with anionic polar group
in the hydrocarbon chain

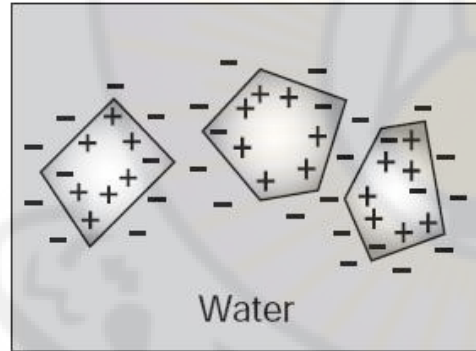


(a)

١. عندما تُضاف كمية الماء الى الاسمنت، فان ذرات الاسمنت تتكتل نتيجة لتفاعلات داخلية مثل التفاعلات الالكتروستاتيكية بين الشحنات المتضادة و كذلك تفاعلات الاماهة . يتم حجز كمية من الماء ضمن هذه التكتلات في الوقت ان هنالك حاجة لهذه الكمية من الماء في تفاعلات الاماهة و في تامين قابلية التشغيل.



Without the
addition of
plasticizer



With the addition of
plasticizer

(b)

٢. عنما تُستخدم مخفضات الماء بأنواعها فإنها تعمل على تخفيض الشد السطحي للماء و الالتصاق بذرات الاسمنت فتتحول الذرات الى محبة للماء (انظر الشكل جانباً)، الامر الذي يؤدي الى تبعثر ذرات الاسمنت و الى توزيع متجانس للمياه و بالتالي زيادة سيولة الخلطة.

الأساس الكيميائي لمخفضات الماء:

للتنوع A :

Lingo-Sulfonte	لجنو-سلفونيت
Hydroxycarboxylic Acids	احماض الهيدروكربوكسيليك
carbohydrates	كربوهيدرات

للتنوع F :

Modified Lingo-Sulfonte	لجنو-سلفونيت معدل
Melamine Formadehyde	ميلامين فورمالدهيد
Naphthaline Foemaldehyde	نفتالين فورمالدهيد
Phenol Formaldehyde	فينول فورمالدهيد

حالة خاصة الخرسانة السائلة:

تُعرّف الخرسانة السائلة وفقاً للمواصفة **ASTM C1017** بأنها الخرسانة التي يكون هبوطها أكبر من 190mm مع المحافظة على ترابط مكوناتها.

وبالتالي يمكن القول أن هذه الخرسانة ذات قابلية تشغيل عالية، يمكن صبها ضمن القوالب بقليل من الرج أو عدمه.

• تُحدد المواصفة **ASTM C1017** نوعين من الإضافات المستخدمة في الحصول على الخرسانة السائلة هما:

Type I-Plasticizing	النوع I الملدن
Type II-Plasticizing and retarding	النوع II الملدن و المؤخر للأخذ

استخدامات الخرسانة السائلة:

يمكن استخدام الخرسانة السائلة في المجالات التالية:

١. في العناصر ذات المقاطع الضيقة (الصغيرة).
٢. في مناطق كثافة التسليح العالية
٣. في حالة الصب تحت الماء باستخدام المخروط (القادوس).
٤. في الخرسانة المصبوبة بواسطة المضخات لتخفيف الضغط و بالتالي زيادة ارتفاع و مسافة الضخ.



- **ملاحظة** ان تأثير أغلب الملدنات على زيادة قابلية التشغيل و السيولة ينحصر بفترة قصيرة تتراوح بين (30-60min) بعد اضافتها للخلطة الخرسانية، حيث تبدأ بعده الخرسانة بفقدان قابلية تشغيلها (هبوطها) بسرعة. لهذا السبب فانه أحيانا تُضاف هذه المواد الى الخرسانة في موقع العمل (الورشة)
- تُضاف هذه المواد اما على شكل بودرة او على شكل سائل.

٢-٢-٢ الإضافات المؤخرة (المبطنة) لزمن الاخذ: الهدف:

تأخير أزمدة أخذ الخلطة الخرسانية. وفقا للمواصفة **ASTM C494** فان هذا التأخير في زمن الاخذ الاولي يتراوح بين (1.00-3.30)h مقارنة بالعينة المرجعية ، كما ان التأخير في زمن الاخذ النهائي يجب ان لا يزيد عن 3.30h .

الاستخدامات:

- ١.الصب في الأوقات الحارة حيث ان درجة الحرارة المرتفعة للخرسانة (30°C) تسرع تصلب الخلطة.
- ٢.تأخير أزمدة الاخذ في ظروف الصب الصعبة (صب الركائز و الاساسات الكبيرة، صب جدران ابار النفط، ضخ الخرسانة مسافة اكبر من المعتاد)
- ٣.تأخير الاخذ للسماح بالقيام بعمليات انهاء خاصة (الاسطح ذات الحصىيات البارزة)

ملاحظة:

من الاجراءات العملية التي يمكن القيام بها لتخفيض درجة حرارة الخرسانة الطرية عند الصب في الأجواء الحارة ، ان نقوم بتبريد ماء الجبل، او تبريد الحصىيات.

يجب الانتباه الى ان مؤخرات الاخذ لا تُخفض درجة الحرارة الأولية للخرسانة.

الأساس الكيميائي لمبطنات الاخذ:

Sugar	السكر
carbohydrates	المواد الكربوهيدراتية
Zink salts	املاح الزنك
Phosphates	الفوسفات

نسب الإضافة ضمن الخلطات الخرسانية:

يجب اعطاء اهتمام خاص لتحديد نسب الإضافة بشكل دقيق تجريبيا لان استخدام كميات غير مناسبة من هذه الإضافات يمكن ان يمنع اخذ و تصلب الخرسانة.

مثال: ان استخدام السكر بنسبة حوالي 0.05% من كتلة الاسمنت تؤدي الى تأخير الاخذ بحوالي اربع ساعات، اما استخدام نسبة عالية من السكر (1-0.2%) من كتلة الاسمنت فيمكن ان تؤدي منع تصلب الاسمنت.

آلية التأثير:

حتى الان آلية واضحة لعمل هذه الإضافات ضمن الخلطة، لكنة من المرجح انها تقوم بتعديل نمو المواد الكريستالية و الهلامية المتشكلة (من مثل هيدروكسيد الكالسيوم) بفعل اماهة الاسمنت ، وذلك من خلال ترسبه على الغلاف المتشكل بسرعة حول ذرات الاسمنت مع بدء إضافة الماء.

ملاحظة:

يمكن ان تؤدي مبطنات الاخذ الى انخفاض مقاومة الخرسانة في العمر المبكر (عمر يوم أو يومين). وفقا للمواصفة ASTM C494 فان مقاومة الخرسانة على عمر ثلاثة أيام يجب ان لا تقل عن 90% من مقاومة الخرسانة المرجعية.

٢-٢-٣ الإضافات المسرعة لزمن الاخذ:

الهدف:

تخفيض (تعجيل) أزمنة أخذ الخلطة الخرسانية. وفقا للمواصفة **ASTM C494** فان هذا التخفيض (التعجيل) في زمن الاخذ الاولي يتراوح بين $(1.00-3.30)h$ مقارنة بالعينة المرجعية ، كما ان التخفيض (التعجيل) في زمن الاخذ النهائي يجب ان لا يزيد عن $3.30h$.

الاستخدامات:

تستخدم هذه الإضافات في الأجواء الباردة لتحقيق الأهداف التالية:

١.زيادة سرعة تطور مقاومة الخرسانة في العمر المبكر ، وفقا للمواصفة **ASTM C494** فان نسبة المقاومة على عمر ثلاثة أيام يجب ان لا تقل عن 125% من مقاومة الخرسانة المرجعية.

٢.تقليل زمن الانضاج

٣.تقليل زمن البدء بعمليات الانهاء للأسطح

ملاحظة:

يوجد طرق أخرى للحصول على خرسانة ذات مقاومة ابتدائية عالية منها:

١.استخدم اسمنت عالي المقاومة الابتدائية (النوع III) وفقا للمواصفة **ASTM C150**.

٢.تخفيض النسبة W/C .

٣.استخدام مخفضات الماء.

٤.الانضاج في درجات حرارة عالية

الأساس الكيميائي لمسرعات الاخذ:

كلور الكالسيوم	Calcium chloride
نترات الكالسيوم	Calcium nitrate
ثيوسينات الصوديوم	Sodium thiocyanate

يُعتبر كلور الكالسيوم CaCl_2 الإضافة الأكثر استخداماً لتسريع الاخذ و لاسيما في الخلطات الخرسانية غير المسلحة، عن طريق تسريع تفاعل امهة سيليكات الكالسيوم و لاسيما C_3S . يعود استخدامه الواسع لرخصه وفعاليته في تخفيض ازمة الاخذ.

المشكلة الرئيسية هي احتوائه على ذرات الكلور التي ستكون متواجدة بجوار حديد التسليح عند استخدامه ضمن الخلطات الخرسانية، مما يجعل خطر حدوث صدأ حديد التسليح عالي.

نسب الإضافة ضمن الخلطات الخرسانية:

يجب ان لا تزيد كمية كلور الكالسيوم المضافة للخلطة عن الحد الضروري للحصول على النتيجة المرغوبة ، تتراوح نسبة الإضافة عادة بين 1-2% من كمية المادة الاسمنتية .

مثال: إضافة كلور الكالسيوم بنسبة 1% من المادة الاسمنتية يؤدي الى تخفيض زمن الاخذ الأولي من 3h الى 1.5h . وزمن الاخذ النهائي من 6h الى 3h ، اما إضافة كلور الكالسيوم بنسبة 2% فيؤدي الى تخفيض زمن الاخذ الأولي الى 1h و زمن الاخذ النهائي الى 2h .

ملاحظة: يؤدي استخدام كلور الكالسيوم بنسبة عالية (أكبر من 2%) الى تأثيرات سلبية على الخلطة منها: زيادة نسبة الانكماش الجاف، صدأ حديد التسليح، انخفاض مقاومة الخرسانة في الاعمار المتأخرة.

الاستخدامات:

يمكن استخدام كلور الكالسيوم بحذر ضمن الخلطات الخرسانية في الحالات التالية:

١. الخرسانة الملونة

٢. الخرسانة المنضجة بالبخر.

٣. الخرسانة المصبوبة ضمن قوالب معدنية مغلقة.

بالمقابل يُمنع استخدام كلور الكالسيوم في الحالات التالية:

١. الخرسانة المسبقة الاجهاد

٢. الخرسانة الحاوية على انابيب من الالمنيوم المغموسة ضمنها

٣. الخرسانة المعرضة لخطر التفاعل القلوي السيليسي.

٤. الخرسانة ذات التماس المباشر مع الماء او التربة الحاوية على الكبريتات

٥. الخرسانة المصبوبة في الطقس الحار.

٦. الخرسانة الكتلية.

٣-٢ الإضافات المولدة للفقاعات الهوائية (مولدات الفقاعات الهوائية) (Air Entrainers):

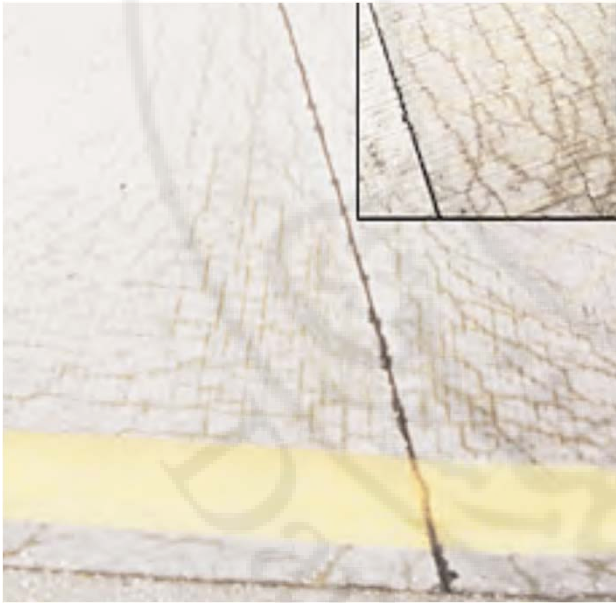
الهدف:

تشكيل فقاعات هوائية مكرو سوبية مستقرة، غير متصلة، متماثلة في الابعاد، و موزعة بانتظام ضمن الخلطة الخرسانية لتؤمن الفراغ اللازم لاستيعاب زيادة حجم الماء الوجود ضمن الخرسانة والناتج عن تعرضها للجليد.

التأثير:

يؤدي استخدام هذه الإضافات ضمن الخرسانة الى التأثيرات التالية:

١. تحسن و بشكل ملفت ديمومة الخرسانة المعرضة لدورات من التجمد و الذوبان.
٢. تحسن مقاومة الخرسانة لتقشر الاسطح الناتج عن استخدام املاح الازابة.
٣. تحسين قابلية تشغيل الخرسانة الطرية بالإضافة الى تخفيض او الغاء النضح و خطر انفصال مكونات الخلطة الطرية
٤. تخفيض مقاومة الخرسانة و يمكن ان تغير ازمدة الاخذ. وفقا للمواصفة **ASTM C260** فان تأثير هذه الإضافات على ازمدة الاخذ يجب ان لا يتعدى $\pm 1.15h$ كما ان مقاومة الخرسانة الحاوية عليها يجب ان لا تقل عن 90% من مقاومة الخرسانة المرجعية.



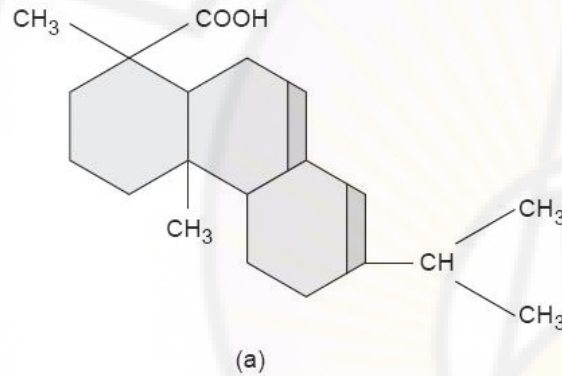
تشقق الخرسانة نتيجة الصقيع.



تقشر سطح الخرسانة نتيجة عدم استخدام مولدات الفقاعات ضمنها، عند تعرضها لأملح الازابة.

آلية التأثير:

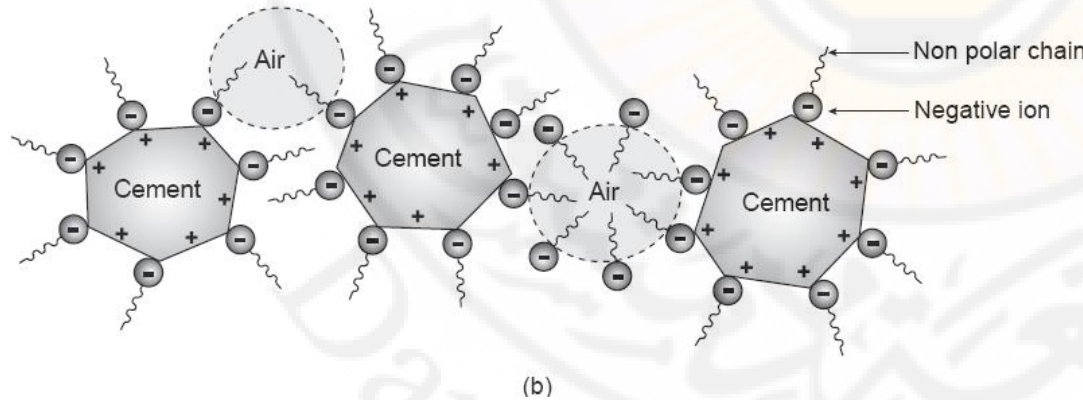
عند إضافة هذه المواد الى الخلطة الخرسانية فإنها تعمل على تخفيض الشد السطحي لماء الجبل و بالتالي تسهيل تشكل الفقاعات الهوائية. هذه الإضافات عبارة عن سلاسل هيدروكربونية تحمل مجموعة سالبة في احد نهايتها مما يجعلها تنجذب نحو حواف ذرات الاسمنت ذات الشحنة الموجبة و تلتصق على سطحها محمولة إياها الى ذرات كارهة للماء، الامر الذي يسهل انتقال فقاعات الهواء المتشكلة لتتموضع بين ذرات الاسمنت كما هو موضح على الشكل في الأسفل.



نسب الإضافة ضمن الخلطات الخرسانية:

تضاف هذه المواد الى الخرسانة بنسبة تتراوح بين $(0.01-0.03)\%$ من وزن الاسمنت فتولد نسبة فراغات ضمن الخلطة تتراوح بين $(1.0-7.5)\%$. الفقاعات المتولدة ذات اقطار بحدود $50\mu m$. يبلغ عددها تقريبا 14 بليون فقاعة في $1m^3$

ملاحظة: تتحسن مقاومة الصقيع بنقصان حجم الفقاعات، كما ان الفقاعات الصغيرة تأثير سلبي اقل على مقاومة الخرسانة من الفقاعات الكبيرة



الأساس الكيميائي لمولدات الفقاعات الهوائية:

Salts of wood resins (vinsol resin)	أملاح الاصماغ الخشبية (صمغ فينيسول)
Salts of petroleum acids	املاح الاحماض البيتروولية
Salts of sulfonated lignin	املاح اللغنين السولفونيتيد
Salts of sulfonated hydrocarbons	املاح الهيدروكربونات السيلفونية

٢-٤ الإضافات المخفضة لنفاذية الخرسانة (Permeability reducing admixtures): الهدف:

تقليل نفاذ الماء الى الخرسانة تحت الضغط.

بشكل عام نفاذية الماء الى داخل الخرسانة يتم بإحدى طريقتين: اما تحت تأثير الضغط الهيدروستاتيكي و يسمى النفاذية و اما عبر التشققات المجهرية و الفراغات الشعرية بفعل ظاهرة الامتصاص الشعري.
ملاحظة: يوجد طرق أخرى للتقليل من نفاذية الخرسانة (غير استخدام مخفضات النفاذية) منها:

١. الاهتمام بتصميم الخلطة من خلال استخدام نسبة W/C الاقل من 0.5 .

٢. زيادة فترة الانضاج (المعالجة) الرطب للخرسانة.

٣. استخدام الإضافات الاسمنتية و لا سيما هباب السيليس (التفاعل البوزولاني).

التأثير:

زيادة ديمومة الخرسانة و لاسيما التي منها على تماس مباشر مع الأوساط المائية، من خلال السيطرة على حركة الماء و الرطوبة و تغلغل ذرات الكلور ضمنها.

آلية التأثير:

تشمل هذه الإضافات نوعين من المواد: مواد صلبة ناعمة جدا تعمل على ملء المسامات ضمن الخرسانة وبالتالي إعاقة مرور الماء ضمن الخرسانة. غالبا تكون عملية الاملاء للفراغات غير تامة و بالتالي يحدث خفض للنفاذية و ليس توقفها. ومواد كريستالية تتفاعل مع الماء و الاسمنت لتشكل سيليكات الكالسيوم المائية (C-S-H) التي تترسب ضمن المسامات و الشقوق المجهرية مانعة الماء من الدخول الى الخرسانة

الأساس الكيميائي لمخفضات النفاذية:

لاتكس	Latex
ستيارات الكالسيوم	Calcium stearate

ملاحظة:

يوجد نوع من الإضافات يُسمى **Damp-proofing Admixtures** (إضافات مانعة للرشح او الرطوبة) يتم تصنيفها بعض الأحيان ضمن مخفضات النفاذية. و هي مؤلفة من مواد صابونية و مواد بترولية تعمل على تشكيل غشاء رقيق على سطح الخرسانة . يقوم هذا الغشاء بطرد الماء و منعه من الدخول الى الخرسانة . هذه المواد ليست ذات فعالية كبيرة في حالة الخرسانة المعرض لضغط هيدروستاتيكي كبير و كذلك في حالة التشققات الحرارية و الميكانيكية التي تحدث ضمن الخرسانة.

أمثلة على هذه الإضافات : bitumen emulsions (مستحلبات بيتومينية) Soaps of calcium (صابون محضر بأملاح الكالسيوم)

٢-٤ الإضافات المانعة لاجتراف الاسمنت بفعل الماء (Anti washout admixtures):

الهدف:

منع اجتراف (انجراف) الاسمنت من الخلطة الاسمنتية عند الصب تحت الماء.

التأثير:

- تعمل هذه الإضافات على زيادة لزوجة ماء الخلط، و على زيادة الترابط بين مكونات الخرسانة ، الامر الذي يسمح بالقيام بعملية الصب تحت الماء و بدون استخدام (لقاوس او السطل) و بحيث يكون فقدان الاسمنت من الخلطة قليل جداً.

آلية التأثير:

- تعمل هذه الإضافات على تكوين جل (منطقة لزجة) في الماء المحيط بذرات الاسمنت فتحميه من الانجراف و تزيد لزوجة الخرسانة و تحسن مقاومتها ضد الانفصال.

الأساس الكيميائي لموانع الانجراف:

Acrylic polymer	بوليمرات أكريليكي
cellulose	مركبات سيلولوزية

نسبة الاضافة:

- تُضاف هذه المواد الى الخلطة الخرسانية بنسبة تعادل 1% تقريبا من وزن المادة الرابطة الاسمنتية.

٢-٥ الإضافات المنظمة لعملية الاماهة (hydration controlling admixtures):

الهدف:

إيقاف اماهة الاسمنت لفترة زمنية معينة ثم معاودة نشاط تفاعل الاماهة. أصبحت هذه الإضافات متاحة في منتصف ثمانينات القرن الماضي (1986) .

التأثير:

- تعمل هذه الإضافات على إيقاف اماهة طوري الالومينات و السيليكات ضمن الاسمنت البورتلندي ثم إعادة تفعيل تفاعلات الاماهة لهذين الطورين بعد فترة زمنية معينة. يمكن ان تصل مدة تثبيط الخرسانة حتى 72h . تتألف هذه الإضافات من الناحية الكيميائية من قسمين:

– الأول : يُسمى المثبط او المؤخر ووظيفته الرئيسية إيقاف اماهة الاسمنت.

– الثاني: يُسمى المنشط ووظيفته إعادة تفعيل اماهة الاسمنت المثبط باستخدام القسم الأول.

مجال الاستخدام:

- تسمح هذه الإضافات بإعادة استخدام الخرسانة الجاهزة المتبقية ضمن الجبالات نتيجة حلول الظلام مثلا.
- تسمح هذه الإضافات بنقل الخرسانة لمسافات طويلة

الأساس الكيميائي لمنظمات الاماهة:

Carboxylic acids	الاحماض الكربوكسيلية
Phosphorus- containing organic acid salts	الفوسفور الحاوي على املاح احماض عضوية

نسبة الإضافة:

- تختلف النسبة وفقاً للاستخدام فعند الحاجة لإطالة أزمانة الاختد تتراوح نسبة الاستخدام بين 1.304ml/kg و cement-26.08ml/kg وعند الحاجة لتثبيت الخرسانة لفرات زمنية طويلة فان نسبة الاستخدام تتراوح بين (2.608ml/kg-83.456ml/kg) .

٢-٦ اضافات تلوين الخرسانة (Coloring admixtures):

الهدف:

مواد طبيعية او اصطناعية تُستخدم لتلوين الخرسانة لأهداف جمالية او لأهداف تتعلق بالسلامة، فمثلاً: تحيط الخرسانة الحمراء اللون بالتمديدات الكهربائية و انابيب الغاز، كما تُستخدم الخرسانة الصفراء اللون لتوضح حواف السلامة في انشاءات الرصف الطرقي و الأرصفة..

نسبة الإضافة:

- يجب ان لا تتعدى نسبة هذه الإضافات نسبة 10% من وزن الاسمنت وعادة يتم استخدامها بنسبة تعادل 6% لان هذه النسبة لا تؤثر على الخواص الفيزيائية للخرسانة. عندما تزيد نسبة الإضافة عن 6% فإنها تبدأ بالتأثير على خواص الخرسانة من حاجتها لكميات اضافية من الماء وما ينعكس بعد ذلك من تأثير سلبي على مقاومة الخرسانة بعد تصلبها.

ملاحظة:

قبل استخدام هذه الإضافات ضمن المشاريع لا بد من اختبار ثباتها اللوني بتعرضها لأشعة الشمس و بتعرضها للمواد الكيميائية و للتسخين بالأتوكلاف



الأساس الكيميائي و الأثر اللوني لهذه الإضافات:

اللون (color)	الإضافة (Pigment)
الرمادي (Gray)	أكسيد الحديد الأسود (Black iron oxide)
الأزرق (Blue)	الكوبالت الأزرق (Cobalt blue)
الأحمر (Red)	أكسيد الحديد الأحمر (Red iron oxide)
البنّي (Brown)	أكسيد الكروم البنّي (Chromium oxide)
الأصفر (Yellow)	أكسيد الحديد الأصفر (Yellow iron oxide)

ملاحظة:

ان الحصول على لون صافي يتطلب استخدام الاسمنت الأبيض مع هذه الإضافات

٧-٢ الإضافات الطاردة الهواء (Air detrainers):

الهدف:

تخفيض محتوى الهواء ضمن الخرسانة.

مجال الاستخدام:

تُستخدم هذه الإضافات عندما لا نستطيع تقليل الفراغات الهوائية عن طريق ضبط مكونات الخلطة، او عن تعديل نسبة مولدات الفقاعات الهوائية.

ملاحظة: نادرا ما يتم استخدام هذه الإضافات لذلك فان نسبة استخدامها و تأثيرها يتم تحديده عن طريق التجارب المخبرية.

الأساس الكيميائي لطاردات الهواء:

Tributyl phosphate	الفوسفات الثلاثي البيوتيل
Water-insoluble esters of carbonic and boric acid	الاستيريات المنحلة بالماء للحمض الكربوني و لحمض البوريك

٨-٢ إضافات متنوعة (Miscellaneous admixtures):

٨-٢-١ الإضافات المخفضة لانكماش الخرسانة (Shrinkage-reducing admixtures):

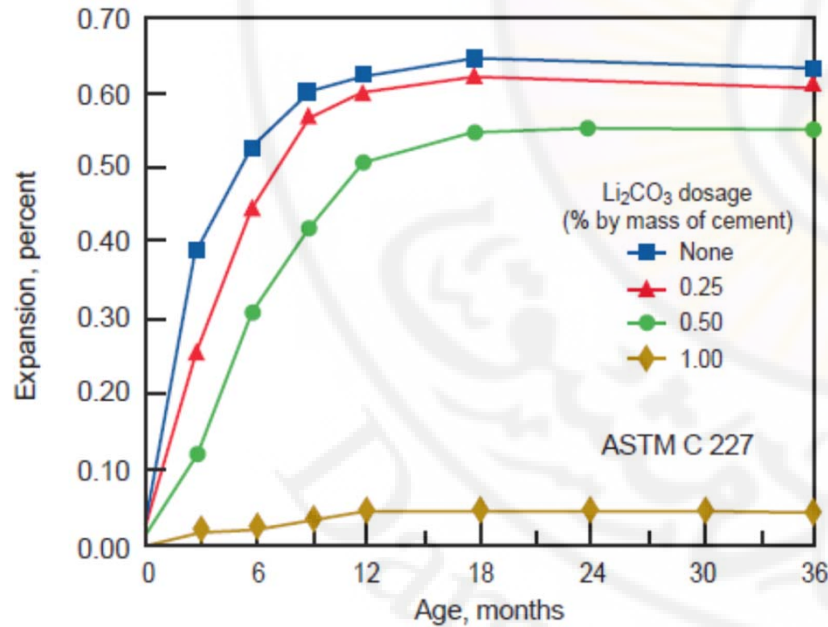
أدخلت هذه الإضافات في الاستخدام في ثمانينات القرن الماضي و هي تعمل على تخفيض الانكماش الجاف بنسبة تتراوح بين (25-50) % . تُستخدم هذه الإضافات في المنشآت من مثل بلاطات الجسور و التي يتوجب فيها تقليل خطر التشققات و تجعد الخرسانة لأسباب جمالية و لأسباب تتعلق بالديمومة. من هذه الإضافات : غليكول لبروبلين (Propylene glycol)

٢- ٨-٢ الإضافات المخفضة المانعة لتآكل حديد التسليح (corrosion inhibitors):

توقف هذه الإضافات تآكل حديد التسليح كيميائياً من خلال إيقاف تفاعل ذرات الكلور مع أكسيد الحديد المتكون على سطح قضبان التسليح إلى تحطم الطبقة الحامية لحديد التسليح والبدء بتشكيل الصدأ. تستخدم هذه الإضافات في المنشآت المعرضة مما يؤدي لأملح الكلور مثل المنشآت البحرية.

من هذه الإضافات نترت الصوديوم (nitrite sodium) ، نترت الكالسيوم (nitrite calcium)

٢- ٨-٣ الإضافات الكيميائية المخفضة للفعالية القلوية الحصوية (مانعات التفاعل القلوي السيليسي) (Chemical admixtures to reduce Alkali-Aggregate reactivity (ASR inhibitors))



بدأ استخدام هذه الإضافات في منتصف التسعينات من القرن الماضي . تعمل هذه المواد على التحكم بالتفاعل القلوي السيليسي (السيطرة و التحكم بالمادة الهلامية المنتفخة و المتشكلة نتيجة هذا التفاعل)

من هذه الإضافات: نترات الليثيوم Lithium nitrate و كربونات الليثيوم Lithium carbonate .

٨-٢-٤ الإضافات الرابطة و العناصر الرابطة (Bonding admixtures and Bonding agents)

- تتألف الإضافات الرابطة من مستحلبات مائية لمواد عضوية مثل المطاط، الاكريليك وغيرها من المواد البوليميرية. حيث تُضاف هذه المواد الى خلطات الاسمنت البورتاندي لزيادة قوة التماسك بين الخرسانة القديمة و الخرسانة الجديدة، كما أنها تحسن مقاومة الخرسانة على الانعطاف و تعيق تسرب ذرات الكلور الى داخل الخرسانة.
- تُضاف هذه المواد الى الخلطة بنسبة تتراوح بين (5-20%) من كتلة المادة الاسمنتية و ذلك وفقا لنوع العمل المنفذ و نوع الإضافة المستخدمة.
- ملاحظة: للحصول على افضل النتائج عند استخدام هذه المواد، يجب ان يكون السطح الذي توضع عليه الخرسانة جافا، نظيفاً وخاليا من الغبار و الدهون و الاوساخ و الطلاء .
- يجب التفريق بين الإضافات الرابطة و العناصر الرابطة، فالإضافات هي احدى مكونات الخرسانة في حين ان العناصر الرابطة تُوضع (تُطبق) على سطح الخرسانة الموجودة (القديمة) مباشرة قبل وضع الخرسانة الجديدة، فهي تعمل كصمغ بين الخرسانة القديمة و الجديدة.
- تُستخدم العناصر الرابطة في اعمال اصلاح و ترميم الخرسانة و هي مكون من المواد البوليميرية (الايبوكسي) او الكراوت (المونة الاسمنتية) المعدلة باللاتيكس.

٩-٢ التوافق بين الإضافات الكيميائية و المواد الاسمنتية:

- يمكن للخلطات الخرسانية الطرية ان تواجه العديد من المشكلات المتنوعة في شدتها بسبب عدم التوافق بين الإضافات الكيميائية وبين الاسمنت او بين الإضافات الكيميائية و بين الإضافات المنيرالية، كما ان عدم التوافق قد يحدث بين الاسمنت و الإضافات الاسمنتية. من نتائج عدم التوافق: فقدان الهبوط للخلطات الطرية، تغير في نسبة الهواء ضمن الخلطة، حدوث تصلب مبكر للخلطة، كما ان عدم التوافق يمكن ان يؤثر على الخرسانة المتصلبة فمثلا التصلب المبكر للخلط الطرية يؤثر سلبا على إمكانية رصها ضمن القالب و هذه ينعكس بشكل سلبي على المقاومة

- لا يوجد طرق اختبار موثوقة لمسائل عدم التوافق بسبب التنوع الكبير في المواد و في ازمنا الخلط و ادواته و كذلك في الظروف البيئية لموقع العمل. فالاختبارات المخبرية لا تعكس الظروف التجريبية في الموقع. وعند ملاحظة عدم التوافق في الموقع فالحل العام هو تغيير الإضافات سواء اكانت كيميائية او مینرالية

١٠-٢ تخزين الإضافات الكيميائية:

- تُخزن الإضافات السائلة في براميل بينما تخزن الإضافات التي تكون على شكل بودرة ضمن صناديق او أكياس بلاستيكية مسبقة الوزن.
- يجب تعريف الإضافات الموزعة على المجابل المركزية بشكل صحيح من خلال بطاقات تعريفية تُلصق عليها لتجنب تلوثها او استخدامها بنسب غير صحيحة.
- الإضافات السائلة تضاف لماء الجبل ثم بعد ذلك للخلطة
- يمكن قياس الإضافات سواء اكانت سائلة او على شكل بودرة وزناً بينما يُمنع قياس البودرة حجماً.
- لا يجوز تجمد الإضافات السائلة لذلك يتم حفظها في أماكن مسخنة اما البودرة فان اقل حساسية تجاه درجة الحرارة و تاثرها الأكبر يكون تجاه الرطوبة.

الحصويات Aggregates

١- مقدمة عامة:

تعتبر الحصويات احدى مواد البناء الرئيسية التي يستخدمها المهندس المدني في مجالا متعددة منها: طبقات الرصف الطرقي ، الخلطات الخرسانية (تشكل الحصويات نسبة تصل 75% من حجم الخلطة)، الخلطات الاسفلتية (يمكن ان تصل نسبة الحصويات الى 90% من حجم الخلطة)، طبقة البلاست المستعملة في خطوط السكك الحديدية،... الخ سيتم اعتماد المواصفة ASTM (American Society for Testing and Materials) في دراسة مواصفات الحصويات.

٢- تصنيف الحصويات:

٢-١ حسب الابعاد:

- **البحص (الحصويات الخشنة) Coarse aggregates:** يشمل الحصويات المحجوزة على المنخل رقم 4 (No4) (4.75mm) وحتى 150mm . في الخلطات الخرسانية العادية المستخدمة في العناصر الانشائية مثل الاعمدة و الجوائز يمكن ان يصل قطر للحصويات الى 25mm ، اما في الخلطات الخرسانية الكتلية فيمكن ان يصل القطر الاعظمي الى 150mm
- **الرمل (الحصويات الناعمة) Fine aggregates:** يشمل الحصويات المارة على المنخل رقم 4 (No4) (4.75mm) و المحجوزة على المنخل رقم 200 (No200) (75µm) .

٢-٢ حسب المصدر:

- **طبيعية:** وتشمل الحصويات (رمل و بحص) المستخرجة من المكامن الطبيعية (شواطئ البحار ، سرير الأنهار..) دون أي تغيير بطبيعتها اثناء عملية الاستخراج. كل ما تحتاجه هذه الحصويات هو عمليات غسل و تحليل حبي للحصول على التدرج المطلوب.

■ **صناعية:** وتقسم الى

- **حصويات مكسرة:** و تشمل الحصويات (البحص، الرمل) الناتج عن عملية تحطيم الصخور الطبيعية.
- **حصويات مصنعة:** و تشمل الحصويات المصنفة كمنتجات ثانوية (مخلفات) لصناعات رئيسية مثل حصويات خبث الفرن العالية لصناعة الحديد، الرماد الطائر (المتطاير) الناتج عن احتراق الفحم الحجري المستخدم كوقود في محطات توليد الطاقة الكهربائية.
- **الحصويات المعادة التدوير:** و تشمل الحصويات الناتجة عن تحطيم نواتج الهدم للمنشآت الخرسانية، و الحصويات الناتجة عن قشط طبقات الاسفلت في الطرقات.

■ ٢- ٣ **حسب الوزن الحجمي:**

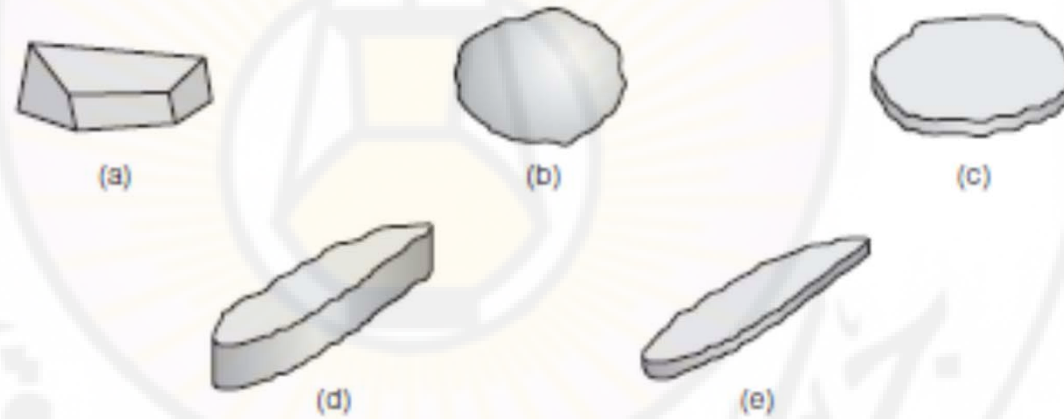
- **الحصويات الخفيفة جداً:** وتشمل الحصويات التي وزنها الحجمي اقل من 500 Kg/m^3 ، وتستخدم لإنتاج خرسانة خفيفة جداً يتراوح وزنها الحجمي بين $(800-1100 \text{ Kg/m}^3)$ ، تستخدم في العناصر غير الانشائية (جدران التقسيم) و في العزل الحراري.
- **الحصويات الخفيفة:** وتشمل الحصويات التي يتراوح وزنها الحجمي بين $(500-1120) \text{ Kg/m}^3$ ، وتستخدم لإنتاج خرسانة خفيفة يتراوح وزنها الحجمي بين $(1200-1800 \text{ Kg/m}^3)$ ، تستخدم في العناصر غير الانشائية و الانشائية و للأغراض المعمارية.
- **حصويات العادية:** وتشمل الحصويات التي يتراوح وزنها الحجمي بين $(1520-1680) \text{ Kg/m}^3$ ، وتستخدم لإنتاج خرسانة خفيفة يتراوح وزنها الحجمي بين $(2300-2400 \text{ Kg/m}^3)$ ، تستخدم في العناصر الانشائية المختلفة.
- **حصويات ثقيلة:** وتشمل الحصويات التي وزنها الحجمي اكبر من 2100 kg/m^3 ، وتستخدم لإنتاج خرسانة وزنها الحجمي أكبر من (3200 Kg/m^3) ويمكن ان يصل الى 4000 Kg/m^3 ، تستخدم في المنشآت النووية.

٣- خواص الحصىيات:

٣- ١ شكل الحصىيات:

يمكن ان نميز الأشكال التالية للحصىيات: المكسرة الحادة الزوايا، المدورة، المسطحة، المتطاولة، المسطحة المتطاولة.

وفقا للمواصفة ASTM D9497 يمكن ان نعرف دليل الشكل **Shape index** ، حيث تكون الحصىيات مسطحة عندما تكون نسبة عرضها الى سماكتها اكبر من 3 . و تكون متطاولة عندما تكون نسبة طولها الى عرضها اكبر من 3 .



اشكال الحصىيات: a حادة الزوايا، b مدورة، c مسطحة، d متطاولة، e مسطحة و متطاولة.

٣- ٢ بنية (نسيج) سطح الحصىيات:

يمكن ان نميز بشكل أساسي بين حصىيات ذات اسطح ناعمة و أسطح خشنة.

ملاحظات عامة خاصة بشكل الحصويات و بنية سطحها:

- يؤثر شكل الحصويات و بنية نسيجها على خواص الخرسانة من حيث قابلية الرص، مقاومة التشوه، و قابلية تشغيل الخلطة الخرسانية.
- الحصويات المدورة ذات السطح الاملس تكون ذات تشابك فيما بينها أقل من الحصويات ذات الحواف الحادة.
- الحصويات المتطاولة و المسطحة يمكن ان تنكسر اثناء عملية رص الحصويات، الامر الذي يؤثر على مقاومة الحصويات و كذلك على مقاومة الخلطات الخرسانية، كما ان هذه الحصويات يمكن ان تخفض قابلية تشغيل الخلطات الخرسانية.
- الحصويات ذات السطوح الناعمة تحتاج الى كميات ماء اقل من الحصويات الخشنة ، بالمقابل فان الحصويات الخشنة تؤمن ترابط افضل مع العجينة الاسمنتية بشكل افضل من الحصويات الملساء

٣- ٢ الكثافة الركامية (الكلية) Bulk density:

تُعرف بأنها كتلة واحدة الحجم .

$$\rho_{\text{bulk}} = M_{\text{dry}} / V_{\text{total}}$$

حيث: M_{dry} : كتلة المادة المجففة بالفرن 105 ± 5 .

V_{total} : الحجم الكلي (حجم الأجزاء الصلبة مع الفراغات بينها)

٣- ٣ الوزن الحجمي الركامي Bulk unit weight

يُعرف بأنه وزن المادة مقسوماً على حجمها الكلي.

$$\gamma_d = \rho_{bulk} * g = \frac{M_{dry}}{V_{total}} * g = \frac{W_{dry}}{V_{total}}$$

حيث: W_{dry} وزن المادة المجففة بالفرن 105 ± 5 .

V_{total} : الحجم الكلي (حجم الأجزاء الصلبة مع الفراغات بينها)

يستخدم الوزن الحجمي في تصميم الخلطات الخرسانية و في حساب نسبة الفراغات البينية بين الحصى. ويتأثر بالعوامل التالية:

- شكل و حالة سطح الحصى.
- توزيع أبعاد الحصى.
- درجة رص الحصى.
- حالة الحصى (جافة، رطبة، مبللة)
- الوزن النوعي للحصى.

و نتيجة لهذه العوامل فان قيمة الوزن الحجمي للحصى تختلف بشكل كبير و تعطي المواصفات قيم استرشادية للوزن الحجمي للحصى. فمثلاً يتراوح الوزن الحجمي للحصى العادية الجافة بين $(1400-1800) \text{Kg/m}^3$.

٣- ٤ محتوى الرطوبة Moisture content

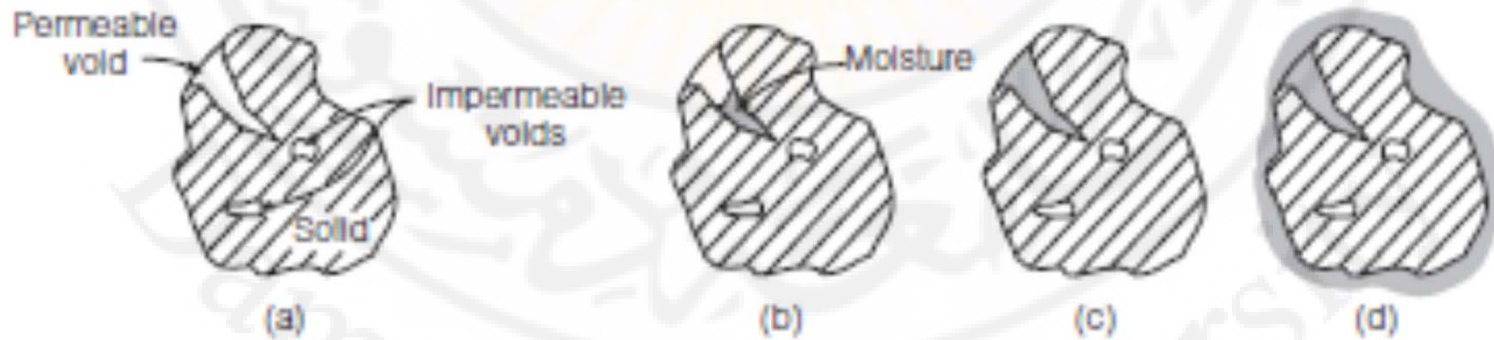
يمكن ان نميز الحالات التالية لمحتوى الرطوبة في الحصىات و ذلك وفقاً لكمية الماء المتواجدة ضمن الفراغات وعلى سطح الحصىة:

(a) **حصىات مجففة بالفرن Oven dry**: وهي الحالة التي تتخلص فيها الحصىة من الماء المتواجد في الفراغات النفوذة وعلى السطح عن طريق تسخين العينة بالفرن بدرجة حرارة $105 \pm 5^\circ\text{C}$.

(b) **حصىات مجففة بالهواء Air dry**: وهي الحالة التي يكون فيها سطح الحصىة جافاً مع تواجد للماء في الفراغات النفوذة.

(c) **حصىات سطحها جاف و مشبعة الفراغات النفوذة Saturated surface-dry (SSD)**: وهي الحالة التي تكون فيها الفراغات النفوذة ممتلئة تماماً بالماء و السطح جاف.

(d) **حصىات رطبة (مبتلة) Damp or Wet**: وهي الحالة التي تكون فيها الفراغات النفوذة ممتلئة بالماء بالإضافة الى تواجد الماء على كامل سطح الحصىة.



تُعرف الرطوبة بأنها النسبة المئوية لوزن الماء في العينة مقسوماً على وزنها الجاف.

$$W = \frac{W_{moist} - W_{dry}}{W_{dry}} * 100$$

حيث: W_{moist} : وزن العينة بحالتها الطبيعية.

W_{dry} : وزن العينة المجففة بالفرن بدرجة حرارة $105 \pm 5^\circ C$

يُعرف الامتصاص (التشرب) بأنه رطوبة العينة في حالة SSD (سطح جاف و فراغات نفوذة ممتلئة بالماء)

٣- ٥ الوزن النوعي Specific gravity :

يُعرف بأنه ناتج قسمة كثافة المادة على كثافة الماء في الدرجة $+4^\circ C$ شريطة ان يكون للمادة و الماء نفس الحجم، و يمكن تعريفه ايضاً بأنه وزن واحدة الحجم من المادة الى وزن واحدة الحجم من الماء في درجة الحرارة النظامية $+4^\circ C$.

يمكن ان يُسمى بالكثافة النسبية relative density و هو عدد لا واحدة .

كثافة الماء تعادل $1g/Cm^3$.

بما ان الحصىات تحتوي على فراغات بعضها غير نفوذ للماء و السوائل و بعضها الآخر منفذ للسوائل و الماء و بالتالي فانه وفقاً لحالة رطوبة الحصىات و فراغاتها يمكن ان نميز بين عدة أنواع للوزن النوعي.

انواع الوزن النوعي :

a. الوزن النوعي الركامي (الكلي) الجاف Bulk dry specific gravity :

$$\text{Bulk Dry Sp. Gr.} = \frac{\text{Dry weight}}{(\text{total particle volume}) * \gamma_w} = \frac{W_s}{(V_s + V_i + V_p) * \gamma_w}$$

b. الوزن النوعي الركامي (الكلي) المشبع Bulk SSD specific gravity :

$$\text{Bulk SSD Sp. Gr.} = \frac{\text{SSD weight}}{(\text{total particle volume}) * \gamma_w} = \frac{W_s + W_p}{(V_s + V_i + V_p) * \gamma_w}$$

c. الوزن النوعي الظاهري Apparent Specific. gravity :

$$\text{Apparent Sp. Gr.} = \frac{\text{Dry weight}}{(\text{Volume not accessible to water}) * \gamma_w} = \frac{W_s}{(V_s + V_i) * \gamma_w}$$

حيث: W_s : وزن الجزء الصلب ضمن الحصوية.

V_s : حجم الجزء الصلب ضمن الحصوية.

V_i : حجم الفراغات غير النفوذة للماء.

V_p : حجم الفراغات النفوذة للماء.

W_p : وزن الماء في الفراغات النفوذة عندما تكون الحصوية في حالة SSD .

W_r : الوزن الحجمي للماء.

الأوزان النوعية و التشرب للحصويات الخشنة (البحص) وفقا للمواصفة ASTM C127:

- يتم أخذ عينة من البحص و غسلها على المنخل 4.75mm و من ثم يتم غمرها بالماء لمدة 24h.
- تخرج العينة من الماء و تمسح بقطعة من القماش الجاف سطح الحصويات (حالة SSD) و نقوم بوزن العينة و ليكن وزنها هو B.
- نقوم بوزن العينة ضمن الماء بواسطة الميزان الهيدروستاتيكي و ليكن C.
- نقوم بتجفيف العينة ضمن الفرن حتى ثبات الوزن و ليكن A .

$$\text{Bulk Dry Sp. Gr.} = \frac{A}{(B - C)}$$

$$\text{Bulk SSD Sp. Gr.} = \frac{B}{(B - C)}$$

$$\text{Apparent Sp. Gr.} = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Absorption(\%)} = \frac{B - A}{A} (100)$$

حيث: **A** : الوزن الجاف للعينة.

B : الوزن في حالة SSD.

C : وزن العينة مغمورة بالماء.



الأوزان النوعية و التشرب للحصويات الناعمة (الرمل) وفقاً للمواصفة ASTM C128:

- يتم أخذ 1Kg تقريباً من الرمل ونجففها بالفرن حتى ثبات الوزن من ثم يتم غمرها بالماء لمدة 24h.
- تخرج العينة من الماء و نعمل على تحريكها نأ على سطح مستوي حتى الوصول لحالة SSD ونأخذ كمية تعادل 500g و لنرمزها S .
- نأخذ بيكنومتر و نملؤه بالماء و نزنه و ليكن الوزن هو B .
- ثم نفرغ البيكنومتر الا من كمية قليلة ، ثم نضيف اليه عينة الرمل S ثم نملأ البيكنومتر بالماء و نوزن و ليكن C
- نخرج العينة من البيكنومتر و نجففها حتى ثبات الوزن فنحصل على الوزن A .

$$\text{Bulk Dry Sp. Gr.} = \frac{A}{(B + S - C)}$$

$$\text{Bulk SSD Sp. Gr.} = \frac{S}{(B + S - C)}$$

$$\text{Apparent Sp. Gr.} = \frac{A}{B + A - C}$$

$$\text{Absorption(\%)} = \frac{S - A}{A}(100)$$

حيث: A : الوزن الجاف للعينة.

B : وزن البيكنومتر مملوء بالماء.

C : وزن البيكنومتر مملوء بالرمل و الماء.

S : وزن الرمل في حالة *SSD*



٣- ٦ نسبة الفراغات بين الحصويات Voids ratio between aggregates

$$V_{voids}\% = 100 - V_s\%$$

$$V_s\% = \frac{V_s}{V} * 100 = \frac{W/\gamma_s}{W/\gamma_h} * 100 = \frac{\gamma_h}{\gamma_s} * 100 = \frac{\gamma_h}{G_{sb} * \gamma_w} * 100$$

حيث: V_s : حجم الفراغات.

γ_s : الوزن الحجمي للحصويات.

γ_h : الوزن الحجمي الركامي للحصويات.

γ_w : الوزن الحجمي للماء.

٣- ٧ درجة الاشباع Degree of saturation

$$S_r\% = \frac{V_w}{V_v} * 100$$

حيث: V_w : حجم الفراغات المملوءة بالماء.

V_v : حجم الفراغات.

مثال:

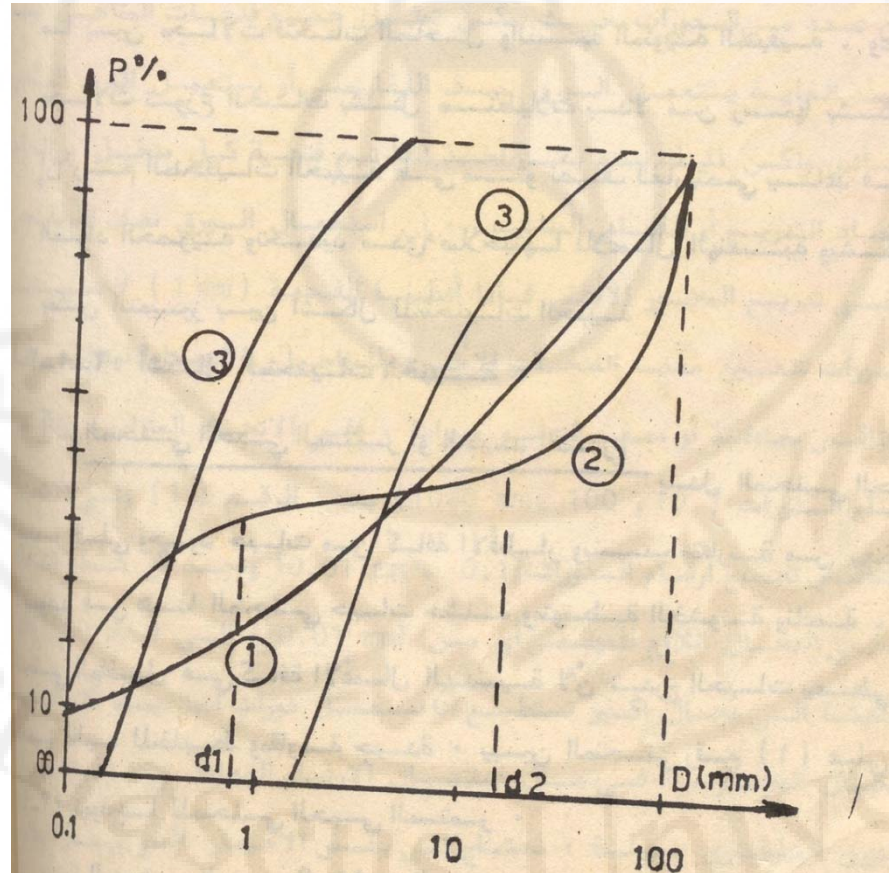
٣-٧ التحليل (التدرج) الحبي Sieve analysis

تهدف عملية التحليل الحبي الى تحديد توزع ابعاد الحصويات من خلال امرارها عبر سلسلة من المناخل القياسية و المختلفة الفتحات (ASTM C136) .

- ترتب المناخل فوق بعضها البعض بحيث يكون اكبرها مقاساً في الأعلى و أصغرها في الأسفل .
- يتم وزن العينة الحصوية المحجوزة على كل منخل ومن ثم يتم حساب النسبة المئوية المارة بينمن كل منخل.
- نرسم العلاقة بين أبعاد فتحات المناخل و النسبة المئوية المارة من كل منخل على ورقة ذات تدرج نصف لوغاريتمي و بذلك نحصل على منحنى التحليل الحبي.
- ان الهدف من معرفة التدرج الحبي هو الحصول على تدرج مناسب للحصويات المراد استخدامها في انتاج الخلطة الخرسانية.
- تسمح عملية التحليل الحبي بمعرفة القطر الأعظمي للحصويات maximum aggregate size و القطر الاعظمي الأسمي للحصويات nominal maximum aggregate size .
- **القطر الأعظمي للحصويات Maximum aggregate size :** يوافق فتحة المنخل الأصغر الذي يمرر 100% من الحصويات من خلاله.
- **القطر الأعظمي الأسمي للحصويات Nominal maximum aggregate size :** يوافق فتحة المنخل الأكبر الذي يحجز نسبة من الحصويات أصغر أو تساوي 10% .

٣-٧-١ أشكال المنحنيات الحبية:

- **المنحني الحبي المستمر أو الجيد التدرج:** يدل المنحني الحبي المستمر على وجود حبات من كافة القطار و بنسب متقاربة، و هذا يعني أنه يوجد حبات خشنة و متوسطة و ناعمة. هذا المنحني يُفضل في كافة الأعمال الهندسية حيث يعطي وزناً حجبياً عالياً للخليط و مقاومة عالية.
- **المنحني الحبي المنقطع التدرج أو السيئ التدرج:** يدل هذا المنحني على وجود حبات خشنة و حبات ناعمة أما الحبات المتوسطة فهي قليلة جداً أو معدومة. يتميز المنحني هذا بوجود منطقة في وسطه ذات ميل قليل (أفقياً تقريباً) و هذا يدل ان حصويات هذه المنطقة تكون مفقودة و غير متوافرة ضمن الخلطة الحصوية.
- **المنحني المنتظم التدرج:** يكون هذا المنحني عادة ذو ميل شديد و هو قريب من الخط الشاقولي ، وهذا يعني ان كافة حبيبات هذا المنحني لها نفس القطر تقريباً او ان مجال تغير الأقطار ضيق جداً



٣-٧-١ المجالات (الحزم) المقبولة لمنحنيات التحليل الحبي وفق ASTM C33:

الحصويات الناعمة (الرمل):

TABLE 5.4 ASTM Gradation Specifications for Fine Aggregates for Portland Cement Concrete (Copyright ASTM, reprinted with permission)

Sieve	Percent Passing
9.5 mm (3/8")	100
4.75 mm (No. 4)	95–100
2.36 mm (No. 8)	80–100
1.18 mm (No. 16)	50–85
0.60 mm (No. 30)	25–60
0.30 mm (No. 50)	10–30
0.15 mm (No. 100)	0–10

الحصويات الخشنة (البحص):

TABLE 5.5 Coarse Aggregate Grading Requirements for Concrete (Reprinted, with permission, from ASTM C33, Table 2, copyright ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428).

Amounts Finer Than Each Laboratory Sieve (Square Openings), Weight Percent														
Size No.	Nominal Size	4 in. (100 mm)	3 1/2 in. (90 mm)	3 in. (75 mm)	2 1/2 in. (63 mm)	2 in. (50 mm)	1 1/2 in. (37.5 mm)	1 in. (25.0 mm)	3/4 in. (19.0 mm)	1/2 in. (12.5 mm)	3/8 in. (9.5 mm)	No. 4 (4.75 mm)	No. 8 (2.36 mm)	No. 16 (1.18 mm)
1	3 1/2 to 1 1/2 in. (90 to 37.5 mm)	100	90 to 100	...	25 to 60	...	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...
2	2 1/2 to 1 1/2 in. (63 to 37.5 mm)	...	...	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...
3	2 to 1 in. (50 to 25.0 mm)	...	...	...	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...
357	2 in. to No. 4 (50 to 4.75 mm)	...	...	...	100	95 to 100	...	35 to 70	...	10 to 30	...	0 to 5	...	...
4	1 1/2 to 3/4 in. (37.5 to 19 mm)	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...
467	1 1/2 in. to No. 4 (37.5 to 4.75 mm)	...	...	...	...	100	95 to 100	...	35 to 70	...	10 to 30	0 to 5	...	...
5	1 to 1/2 in. (25.0 to 12.5 mm)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 10	0 to 5	...	...	...
56	1 to 3/8 in. (25.0 to 9.5 mm)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	40 to 85	10 to 40	0 to 15	0 to 5	...	...
57	1 in. to No. 4 (25.0 to 4.75 mm)	...	...	...	...	...	100	95 to 100	...	25 to 60	...	0 to 10	0 to 5	...
6	3/4 in. to 3/8 in. (19.0 to 9.5 mm)	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	0 to 5	...	...
67	3/4 in. to No. 4 (19.0 to 4.75 mm)	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	...	20 to 55	0 to 10	0 to 5	...
7	1/2 in. to No. 4 (12.5 to 4.75 mm)	...	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	40 to 70	0 to 15	0 to 5	...
8	3/8 in. to No. 8 (9.5 to 2.36 mm)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 to 100	10 to 30	0 to 10	0 to 5

مثال:

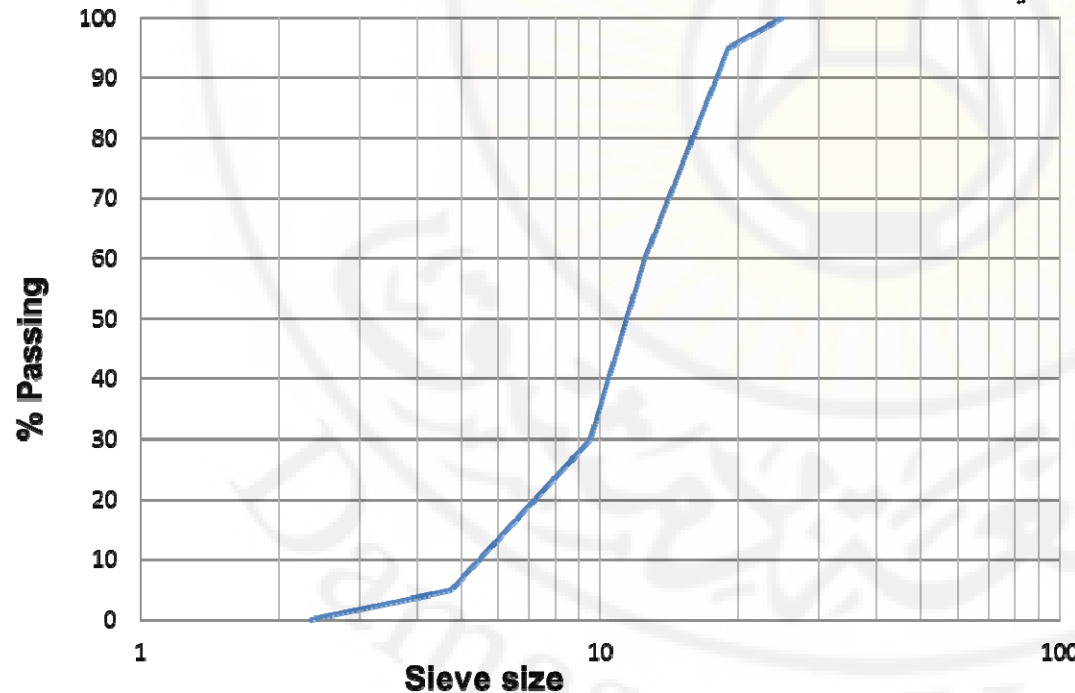
أجريت تجربة التحليل الحبي على عينة من الحصىات وزنها 8145g ، فكانت الأوزان المجوزة على كل منخل كما هو مبين في الجدول التالي:

القر	2.36	4.75	9.5	12.5	19	25	قطر المنخل (mm)
0	375	2030	2435	2850	405	0.0	الوزن المجوز على كل منخل g

• المطلوب: حساب النسبة المئوية المارة من كل منخل.

• حساب القطر الأعظمي و القطر الأسمي الأعظمي.

• رسم منحنى التحليل الحبي.



٣-٧-٢ معامل النعومة **Fineness modulus** :

يُعرف بأنه عامل يصف البعد الوسطي للحصويات و يتم الحصول عليه من جداول التحليل الحبي، و يساوي مجموع النسب المئوية التراكمية المجوزة على سلسلة محددة من المناخل مقسوماً على 100

سلسلة المناخل:

(0.15mm-0.3mm-0.6mm-1.18mm-2.36mm-4.75mm-9.5mm-19.0mm-37.5mm-75mm and 150mm.)

(No.100-50-30-16-8 and 4 and 3/8in-3/4in-1.1/2in-3in-and 6in)

- يُستخدم عامل النعومة في تصميم الخلطات الخرسانية.
- تتراوح قيمته للحصويات الناعمة بين (2.3-3.1) .
- تتراوح قيمته للحصويات الخشنة بين (5-8).

مثال:

٣-٧-٣ خلط (مزج) الحصويات Blending aggregate:

ان وجود التدرج الحبي للحصويات أمر صعب جداً ، لذلك نقوم بمزج أكثر من نوع من الحصويات بهدف الحصول على تدرج حبي يحقق متطلبات المواصفات المعتمدة.
للقيام بعملية المزج نستخدم المعادلتين التاليتين:

$$P_i = A_1 * X_1 + A_2 * X_2$$

$$1 = X_1 + X_2$$

حيث: X_1, X_2 : نسبة المزج لكل نوع من الحصويات.

P_i : النسبة المئوية المارة للمزيج.

A_1, A_2 : النسبة المئوية المارة لكل نوع من الحصويات.

مثال:

خواص الحصويات المخلوطة:

عندما يتم خلط نوعين من الحصويات أو أكثر من مصادر مختلفة لتشكيل خليط يحقق المواصفات، فإنه يمكن معرفة بعض خواص هذا الخليط بالاعتماد على خواص الحصويات المكونة له.

يتم حساب الخواص من العلاقة التالية:

$$X = X_1 * P_1 + X_2 * P_2 + \dots + X_i * P_i \dots$$

حيث: X : خاصية المزيج المدروسة .

$P_1, P_2, \dots, P_i$: نسب الخلط لكل نوع من الحصويات .

$X_1, X_2, \dots, X_i$: الخاصية المدروسة لكل نوع من الحصويات .

باستثناء خواص الوزن النوعي، الوزن الحجمي، الكثافة فإنها تعطى من العلاقة التالية:

$$G = \frac{1}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_i}{G_i}}$$

حيث: G : خاصية المزيج المدروسة (وزن نوعي، وزن حجمي، كثافة) .

$P_1, P_2, \dots, P_i$: نسب الخلط لكل نوع من الحصويات .

$G_1, G_2, \dots, G_i$: الخاصية المدروسة لكل نوع من الحصويات .

مثال:

٨-٣ قساوة الحصويات :Hardness of aggregates

تُعبّر عن مقاومة الحصويات للتآكل بالاحتكاك فيما بينها أو نتيجة لحركة مرور ثقيلة عليها. وهي خاصية مهمة جداً للخرسانة المستخدمة في الطرق و اسطح الأرضيات المعرضة للحركة المرورية عليها.

- تُحدد قساوة الحصويات عن طريق تجربة لوس انجلس (ASTM C131, ASTM C535) التي يقوم مبدؤها على وضع كمية من الحصويات ضمن وعاء (طبل) اسطواني دوار، يُضاف اليها عدد من الكرات الفولاذية ذات حجم معين و عدد معين.
- تُجري التجربة على الحصويات المحجوزة على المنخل ذو الفتحة 1.7mm .
- بعد انتهاء التجربة تُنخل الحصويات من جديد على نفس المنخل (1.7mm) .
- نعين معامل لوس أنجلس من العلاقة:

$$L.A\% = \frac{W_0 - W_f}{W_0} \times 100$$

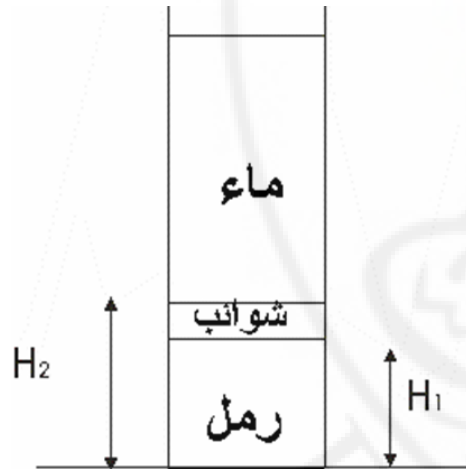
حيث: W_0 : الوزن الأصلي للعينة g.

W_f : الوزن المتبقي (المحجوز) على المنخل ذو الفتحة 1.7mm .

- كلما كان معامل لوس انجلس صغيراً كلما كان كانت الحصويات قاسية.

٣-٩ وجود الغضار و المواد الأصغر من 75µm ضمن الحصىات Presence of clay and materials finer than 75µm in aggregates

- ان وجود الغضار و المسحوق على سطح الحصىات يعيق ترابطها مع العجينة الاسمنتية و يزيد حاجة الخلطة الخرسانية للماء.
- يتم تحديد نسبة الغضار و المسحوق باستخدام تجربة المكافئ الرملي .
- تقوم التجربة على وضع عينة من الحصىات الناعمة (الرملي) (المر من المنخل ذو الفتحة 4.75µm) ضمن أنبوب اختبار يحتوي محلول مشتم هو كلور الكالسيوم يعمل على فصل الشوائب عن اسطح الحصىات الناعمة .
- نقوم برج الأنبوب آليا لمدة 45sec ثم نترك الأنبوب بالوضع الشاقولي و نقوم بقراءة ارتفاع الرمل و ارتفاع الرمل مع الشوائب و نوجد المعادل الرملي من العلاقة التالية:



$$E.S = \frac{H_1}{H_2} \times 100$$

حيث: H_1 : ارتفاع الرمل.

H_2 : ارتفاع الرمل مع الشوائب.

- يكون الرمل مقبول للاستخدام في الخرسانة العادية اذا كان المكافئ الرملي يتراوح بين 60-70%.
- يكون الرمل نظيفاً و يُستخدم في البيتون العالي المقاومة اذا كان المكافئ الرملي يتراوح بين 70-80%.
- اذا كانت قيم المعادل الرملي أقل من القيم السابقة فانه يُنصح بغسل الرمل أو نخله أو بالأثنين معاً.

ماء الخلط mixing water

- يجب ان يكون الماء المستعمل في خلط الخرسانة و غسل الركام، نظيفاً و خالياً من المواد الضارة مثل الزيت و الاحماض و القلويات و الاملاح الأخرى، التي قد تؤثر تأثيراً متلفاً على الخرسانة أو فولاذ التسليح.
- يُشترط في الماء ألا تزيد أملاح الكلوريدات الذائبة فيه على 0.5g/l ، و املاح الكبريتات على 0.3g/l ، و الأملاح الكلية على 2g/l .
- ان الماء الصالح للشرب مناسب في جميع الأحوال لخلط الخرسانة.
- لا يُسمح باستعمال ماء البحر لخلط الخرسانة المسلحة، و ان كان يجوز استعماله عند الضرورة في الخرسانة العادية دون تسليح ، مع زيادة كمية الاسمنت للوصول الى الدرجة المطلوبة في مقاومة الخرسانة. و تُحدد كمية الزيادة بموجب تجارب نظامية خاصة بذلك. وفي كل الحالات يجب اجراء تحارب أولاً، و في حال نجاحها يتم السماح باستعمال ماء البحر
- يمكن استعمال الماء غير الصالح للشرب في خلط الخرسانة اذا كان:
 - زمن الأخذ الابتدائي لعينات الاسمنت المجهزة بهذا الماء لا يزيد بأكثر من 30min على زمن الأخذ الابتدائي لعينات من الاسمنت ذاته المخلوط بالماء الصالح للشرب، و بحيث لا يقل زمن الابتدائي عن 45min في كل الأحوال.
 - مقاومة الضغط بعد 7 أيام، أو 28 يوماً، للعينات القياسية التي يُستعمل في خلطها هذا الماء لا تقل عن 90% من مقاومة الضغط لعينات مماثلة خلطت بماء صالح للشرب.

ماء الخلط mixing water

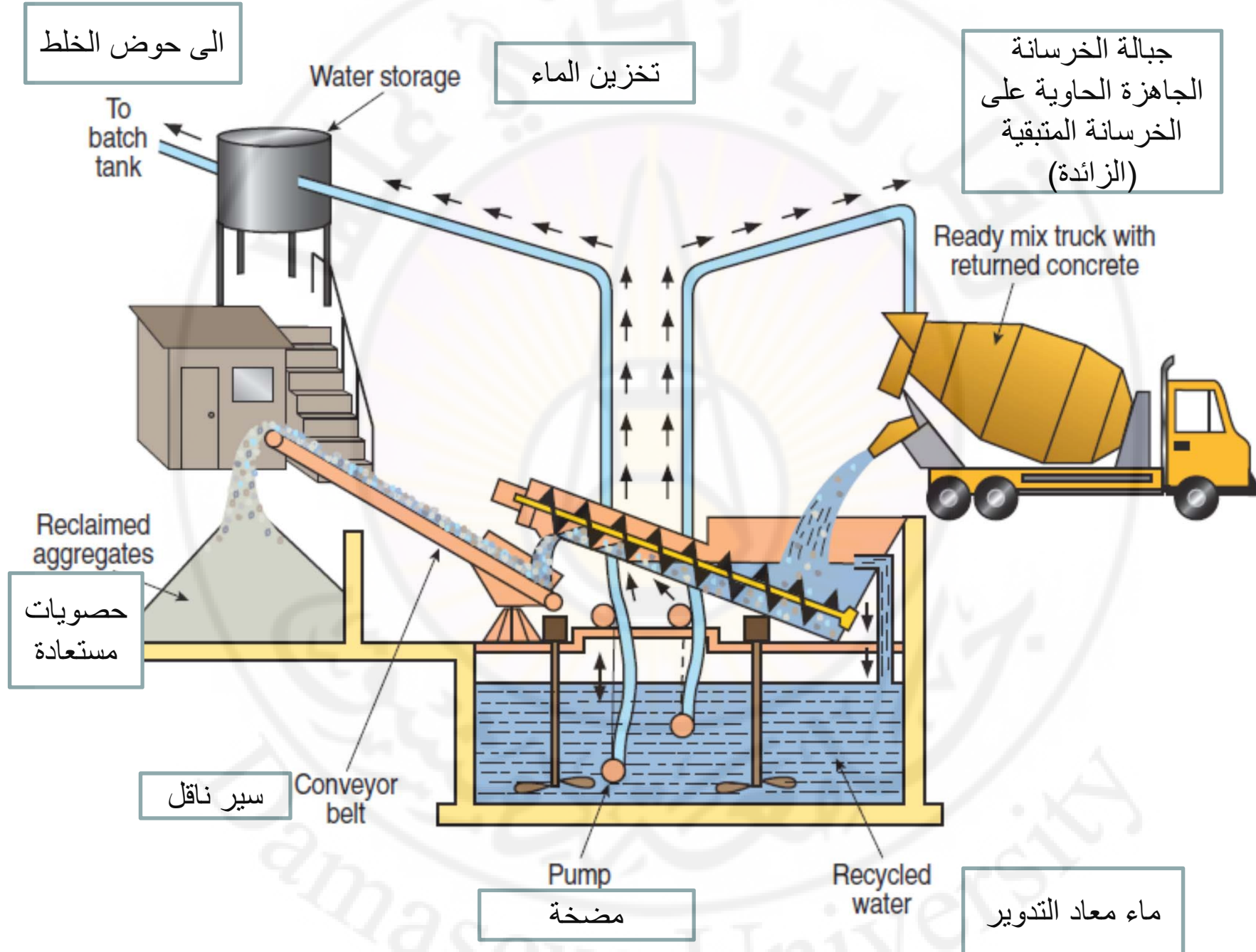
- يجب ان يكون الماء المستعمل في خلط الخرسانة و غسل الركام، نظيفاً و خالياً من المواد الضارة مثل الزيت و الاحماض و القلويات و الاملاح الأخرى، التي قد تؤثر تأثيراً متلفاً على الخرسانة أو فولاذ التسليح.
- يُشترط في الماء ألا تزيد أملاح الكلوريدات الذائبة فيه على 0.5g/l ، و املاح الكبريتات على 0.3g/l ، و الأملاح الكلية على 2g/l .
- ان الماء الصالح للشرب مناسب في جميع الأحوال لخلط الخرسانة.
- لا يُسمح باستعمال ماء البحر لخلط الخرسانة المسلحة، و ان كان يجوز استعماله عند الضرورة في الخرسانة العادية دون تسليح ، مع زيادة كمية الاسمنت للوصول الى الدرجة المطلوبة في مقاومة الخرسانة. و تُحدد كمية الزيادة بموجب تجارب نظامية خاصة بذلك. وفي كل الحالات يجب اجراء تحارب أولاً، و في حال نجاحها يتم السماح باستعمال ماء البحر
- يمكن استعمال الماء غير الصالح للشرب في خلط الخرسانة اذا كان:
 - زمن الأخذ الابتدائي لعينات الاسمنت المجهزة بهذا الماء لا يزيد بأكثر من 30min على زمن الأخذ الابتدائي لعينات من الاسمنت ذاته المخلوط بالماء الصالح للشرب، و بحيث لا يقل زمن الابتدائي عن 45min في كل الأحوال.
 - مقاومة الضغط بعد 7 أيام، أو 28 يوماً، للعينات القياسية التي يُستعمل في خلطها هذا الماء لا تقل عن 90% من مقاومة الضغط لعينات مماثلة خلطت بماء صالح للشرب.

تدوير المياه الناتجة عن صناعة الخرسانة:

- تُعتبر صناعة الخرسانة الجاهزة امام تحدي كبير يتمثل في التعامل مع كمية كبيرة من الخرسانة المتبقية (المنتجة وغير المستخدمة) و التي تمثل نسبة تتراوح بين 3-5% من مجمل كمية الخرسانة المنتجة. بالإضافة لكميات المياه الكبيرة المستخدمة في تنظيف الجبالات من هذه البقايا.
- تشمل المياه المعادة التدوير: مياه غسل الجبالات المتحركة و المجابل المركزية، مياه العواصف المطرية الساقطة فوق منطقة المجابل المركزية، مياه الخرسانة المتبقية، مياه قص وتكسير الخرسانة المتصلبة.
- أنشأت العديد من المجابل أنظمة تدوير لهذه المياه كما هو مبين بالشكل المرفق و الذي يعتمد بشكل أساسي على تجميع المياه ضمن احواض ترسيب كبيرة بحيث تترسب الذرات الصلبة في القاع و المياه الصافية في الأعلى و التي يمكن أعاد استخدامها ضمن الخلطات الخرسانية اذا حققت الاشتراطات الواردة في المواصفات.

اشتراطات استخدام المياه الناتجة عن صناعة الخرسانة كماء خلط (جبل):

- الكتلة المضافة من المادة الصلبة الى الخلطة الخرسانية و الاتية من الماء المستعاد، يجب ان تكون اقل من 1% من الكتلة الكلية للحصويات المتواجدة أصلاً ضمن الخلطة.
 - يجب ان تحقق المياه الاشتراطات المتعلقة بنسب المواد الكيميائية المسموحة وفقاً للمواصفة المعتمدة مثل (الكور، الكبريتات، الاحماض، الزيوت، القلويات،....)
 - يجب ان تحقق المياه الاشتراطات الخاصة بأزمة الأخذ للإسمنت و كذلك المقاومة بالضغط للخرسانة بأعمار 7, 28 يوماً وفقاً للمواصفة المعتمدة.
 - يجب الأخذ بعين الاعتبار التأثير لهذه المياه على الخرسانة الخاصة كالخرسانة المسبقة الاجهاد، الخرسانة المعرضة لظروف تعرض شديدة، الخرسانة المعمارية.
- ملاحظة: يمكن تقدير كتلة المواد الصلبة الموجودة في الماء المستعاد وفقاً لكثافة الماء.



تصميم الخلطة الخرسانية وفقا ACI 211.1

Proportioning of concrete mixtures according to ACI 211.1

١- مقدمة عامة:

تتكون الخلطة الخرسانية من الحصىات (بحص و رمل) و اسمنت بورتلندي و ماء بالإضافة الى الإضافات الاسمنتية (المنيرالية) و الإضافات الخرسانية (الكيميائية). سيتم تصميم الخلطة بطريقة الحجوم المطلقة.

٢- الاعتبارات الأساسية لتصميم الخلطة:

- الكلفة
- قابلية التشغيل
- المقاومة
- الديمومة

٢- ١ الكلفة Cost:

تُعتبر تكلفة الاسمنت البورتلندي أكبر بكثير من تكلفة الحصىات و بالتالي يجب الأخذ بعين الاعتبار كل الخطوات التي من شأنها أن تخفض كمية الاسمنت دون أن يؤثر ذلك على الخواص المطلوبة من الخرسانة مثل المقاومة و الديمومة.

٢- ٢ قابلية التشغيل Workability:

تُعرف قابلية تشغيل الخرسانة الطرية بأنها مقدار الجهد أو العمل الواجب إنجازه للتغلب على قوى الاحتكاك بين حبيبات الخرسانة من أجل الحصول على خرسانة تامة الرص.

تُعتبر قابلية التشغيل خاصية مركبة من جزأين:

- **القوام (consistency):** و يُعبر عن سهولة جريان الخرسانة.
- **التماسك (الترابط) (cohesiveness):** يجب ان تحقق الخرسانة الطرية درجة ثبات كافية (أي ان تكون ذات قدرة على الاحتفاظ بالماء (عكس النضح) و قدرة على المحافظة على ثبات الحصىات الخشنة ضمنها (عكس الانفصال).

ان معرفة قيمة قابلية التشغيل المناسبة للخلطة الخرسانية يرتبط بأمرين:

- نوع المنشأ
- طريقة الصب و الرص و الانهاء للخلطة الخرسانية.

اختبارات قابلية تشغيل الخرسانة:

تُعتبر الطبيعة المزدوجة لقابلية التشغيل سببا رئيسيا لعدم وجود طريقة واحدة فقط لاختباراتها في الحالة الطرية. ان اهم الاختبارات المستخدمة لتحديد قابلية تشغيل الخرسانة هي:

- اختبار الهبوط باستخدام مخروط ابرامز (slump test) .
- اختبار Vebe test .
- اختبار عامل الرص Compacting factor test

اختبار الهبوط Slump test:

يُستخدم هذا الاختبار لتحديد قوام الخرسانة باستخدام مخروط ناقص (جذع مخروط) ارتفاعه 30Cm و قطر قاعدته السفلى 20Cm و قطر قاعدته العليا 10Cm .
يُجرى الاختبار وفقاً للخطوات التالية:

١. يُنظف المخروط بقطعة قماش رطبة ثم يُوضع على طاولة مستوية و يُملأ بالخرسانة الطرية على ثلاث طبقات حيث تُرص كل طبقة 25 ضربة باستخدام قضيب الرص (قطر قضيب الرص 1.6Cm و طوله 60Cm).

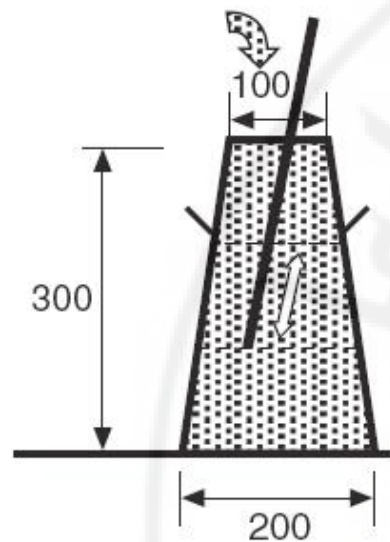
٢. بعد الملء نقوم بتسوية سطح المخروط، ثم يُرفع دفعة واحدة شاقولياً.

٣. يُقاس مقدار الهبوط للخرسانة من ارتفاعها الأصلي كما في الشكل المرفق وتُقارن القيمة الناتجة مع قيم المواصفات لتحديد قوام الخرسانة الطرية.

٤. يُقاس الهبوط مقرباً إلى اقرب 5mm .

العلاقة بين هبوط المخروط القياسي و قوام الخرسانة و المجال المفضل لاستعمالها

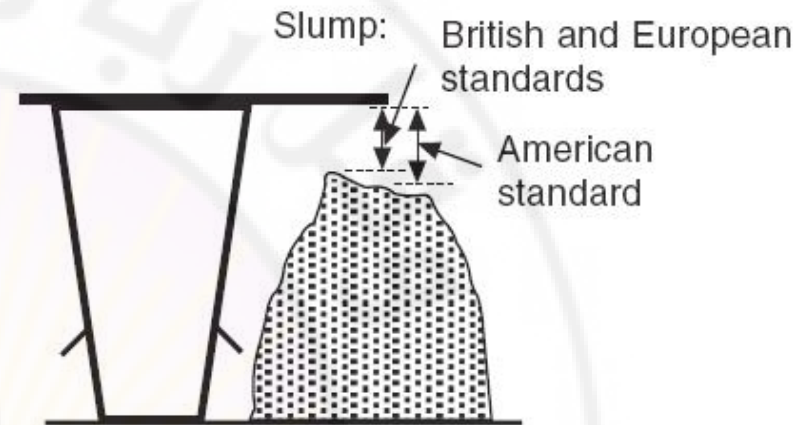
هبوط مخروط أبرامز (mm)	الخرسانة		المجال المفضل لاستعمالها
	قوامها	قابلية تشغيلها	
0-25	جامد جداً	منخفضة جداً	تستعمل في الأعمال الخرسانية الخاصة ذات المقاوَمات العالية جداً، ويستعمل رج ميكانيكي قوي جداً
25-50	جامد	منخفضة	تستعمل في القطاعات الخرسانية ذات المقاوَمات العالية، ويستعمل رج ميكانيكي قوي.
50-100	مائع	متوسطة	تستعمل في القطاعات الخرسانية المسلحة العادية، ويستعمل رج عادي
100-150	سائل	عالية	تستعمل في القطاعات الخرسانية الصغيرة أو الكثيفة التسليح غير المناسبة للرج، ويستعمل رج يدوي.



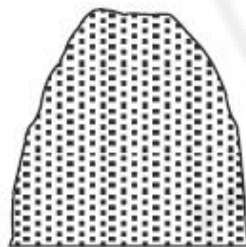
1. The cone is filled with concrete in three equal layers, and each layer is compacted with twenty-five tamps of the tamping rod.



2. The cone is slowly raised and the concrete is allowed to slump under its own weight.



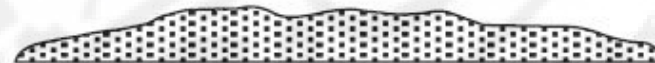
3. The slump is measured using the upturned cone and slump rod as a guide



True



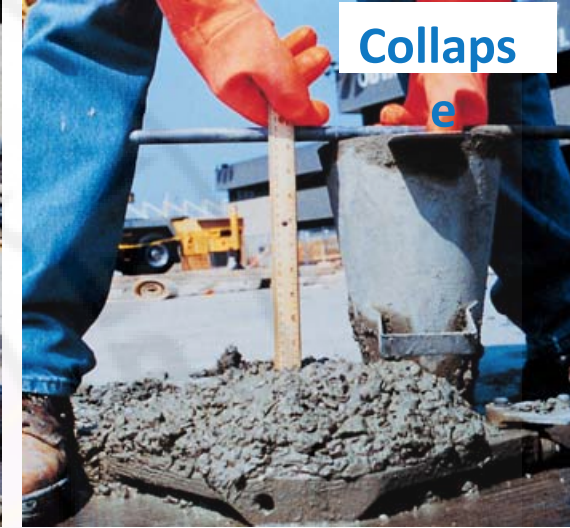
Shear



Collapse

Types of slump

الهبوط mm	قابلية التشغيل
0	لا هبوط
5-10	قليلة جدا
15-30	قليلة
35-75	متوسطة
80-155	عالية
أكبر من 160 و حتى الانهيار	عالية جدا



اختبار Vebe test :

يُعتبر هذا الاختبار مناسب جداً للخلطات الخرسانية الطرية ذات قابلية التشغيل المنخفضة و المنخفضة جداً، حيث نقوم بقياس الزمن الذي تحتاجه الخرسانة الطرية لكي تتحول من الشكل المخروطي الى أسطوانة افقية السطح تحت تأثير الاهتزاز باستخدام الجهاز المبين جانباً.

يتألف جهاز الاختبار من قالب اسطواني معدني قطره الداخلي $240 \pm 5 \text{mm}$ و ارتفاعه 200mm ، و طاولة رج (اهتزاز) و قمع و قرص زجاجي قطره 230mm و سماكته 10mm و مخروط ناقص (جذع مخروط) له نفس ابعاد مخروط ابرامز.

يُجرى الاختبار وفقاً للخطوات التالية:

١. يوضع المخروط ضمن القالب الاسطواني بحيث يتطابق مركز المخروط مع مركز الأسطوانة.



٢. نستخدم القمع لملء المخروط بالخرسانة الطرية على ثلاث طبقات و رص لكل طبقة ب 25 طريقة.
٣. بعد الانتهاء من الملء، نرفع القمع و نسوي سطح الخرسانة و نرفع المخروط بحرص.
٤. نجعل القرص الزجاجي الشفاف بتماس مع سطح الخرسانة و نحرر نقطة تثبيته.
٥. نشغل طاولة الاهتزاز و نقيس الزمن من لحظة بدء الاهتزاز و حتى إعادة قولبة الخرسانة ضمن القالب الاسطواني و نستدل على ذلك من تغطية السطح السفلي للقرص الزجاجي بالعجينة الاسمنتية.
٦. يُقاس الزمن مقربا لأقرب ثانية.

تتراوح قيمة الزمن المسجل بين (3-30)sec .

اختبار عامل الرص compacting factor :

يُستخدم هذا الاختبار لتحديد درجة رص الخرسانة القليلة و المتوسطة و العالية قابلية التشغيل باستخدام كمية عمل نظامية.

يُجرى هذا الاختبار بواسطة الجهاز المبين جانبا و الذي يتألف من:

- مخروط ناقص (جذع مخروط) علوي ، القطر الداخلي لقاعدته العليا 260mm و القطر الداخلي لقاعدته السفلية 130mm و ارتفاعه 280mm .
- مخروط ناقص (جذع مخروط) سفلي ، القطر الداخلي لقاعدته العليا 240mm و القطر الداخلي لقاعدته السفلية 130mm و ارتفاعه 130mm



• أسطوانة قطرها الداخلي 150mm و ارتفاعها 285mm .

المسافة بين أسفل المخروط الأول و أعلى المخروط الثاني هي 200mm و المسافة بين أسفل المخروط الثاني و أعلى الأسطوانة هي 200mm . يوجد بوابة في أسفل كل مخروط، يتم غلقها و فتحها يدويا.

يُجرى الاختبار وفقا للخطوات التالية:

١. توضع الخلطة الطرية ضمن المخروط العلوي (البوابة مغلقة) دون اية عملية رص.
٢. تُفتح البوابة الموجودة في أسفل المخروط العلوي، بحيث يُسمح بهبوط الخرسانة تحت تأثير وزنها الذاتي الى المخروط الثاني.
٣. نكرر العملية نفسها للمخروط السفلي فتمر الخرسانة الى الاسطوانة
٤. بعد الانتهاء من ملء الأسطوانة، يُسوى سطحها و تُنظف جوانبها و حوافها الخارجية، ثم يُعين وزن الخرسانة المرصوفة جزئيا.
٥. يُعاد ملء الأسطوانة من نفس الخلطة الخرسانية على ثلاث طبقات و 25 ضربة لكل طبقة و يُعين وزن الخرسانة المرصوفة كليا. معال الرص يُعطى من العلاقة:

$$\text{معال الرص} = \frac{\text{وزن الخرسانة المرصوفة جزئيا}}{\text{وزن الخرسانة المرصوفة كليا}}$$

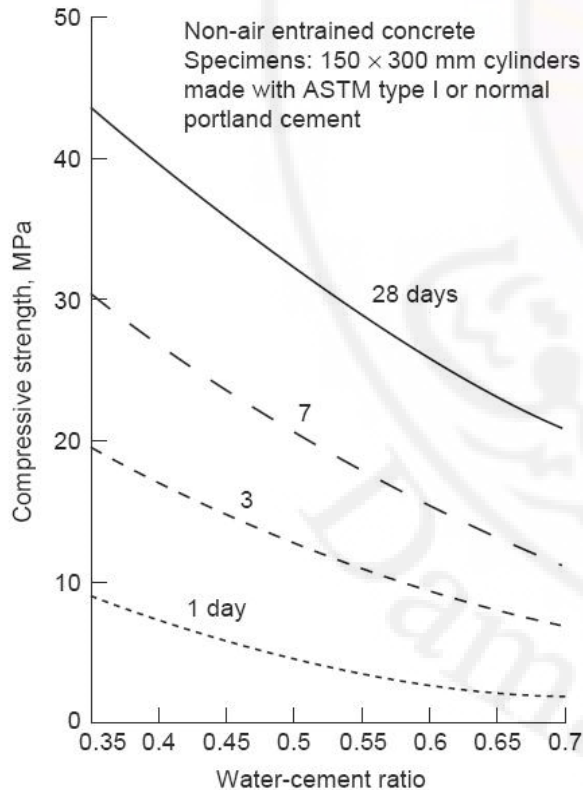
تتراوح قيم معامل الرص بين 0.78 - 0.95 .

العوامل المؤثرة على قابلية تشغيل الخرسانة الطرية:

تتأثر قابلية التشغيل بالعوامل التالية:

- كمية الماء .
- كمية الاسمنت.
- التدرج الحبي للحصويات
- الإضافات

٢- ٣ المقاومة على الضغط للخرسانة Compressive strength of concrete:



تُعتبر المقاومة على الضغط للخرسانة المتصلبة من اهم الخواص لدى مهندسي التصميم و ضمان الجودة كونها ترتبط بالعديد من الخواص من مثل معامل المرونة و النفوذية بالإضافة الى كون اخبارها سهل نوعا ما.

تؤثر على المقاومة على الضغط العديد من العوامل من مثل : نسبة W/C ، درجة الاماهة للإسمنت البورتلندي، نسبة الفراغات ضمن الخرسانة، كمية الاسمنت، الحصويات، الإضافات، شروط الانضاج، معايير الاختبار.

٢- ٤ ديمومة الخرسانة Durability of concrete:

تُعرف ديمومة الخرسانة بقدرتها على البقاء في الخدمة في مواجهة التأثير التخريري للعوامل الجوية، و العوامل الكيميائية، و الحت وغيرها، خلال الفترة التصميمية للمنشأ. ترتبط بشكل مباشر بنفوذية الخلطة الخرسانية.

٣- المعطيات الواجب توفرها قبل البدء بعملية التصميم:

- التحليل الحبي للحصويات الخشنة و الناعمة و عامل النعومة للحصوات الناعمة.
- الوزن الحجمي الركامي (الكلي) الجاف للحصويات الخشنة
- رطوبة و تشرب (امتصاص) الحصويات الناعمة و الحصويات الخشنة.
- متطلبات العمل (المقاومة المميزة على عمر 28 يوم ، نسبة الفراغات الدنيا، مقدار هبوط الخرسانة الطرية استخدام مخروط ابرامز ، W/C ، القطر الأعظمي للحصويات)

٤- خطوات تصميم الخلطة:

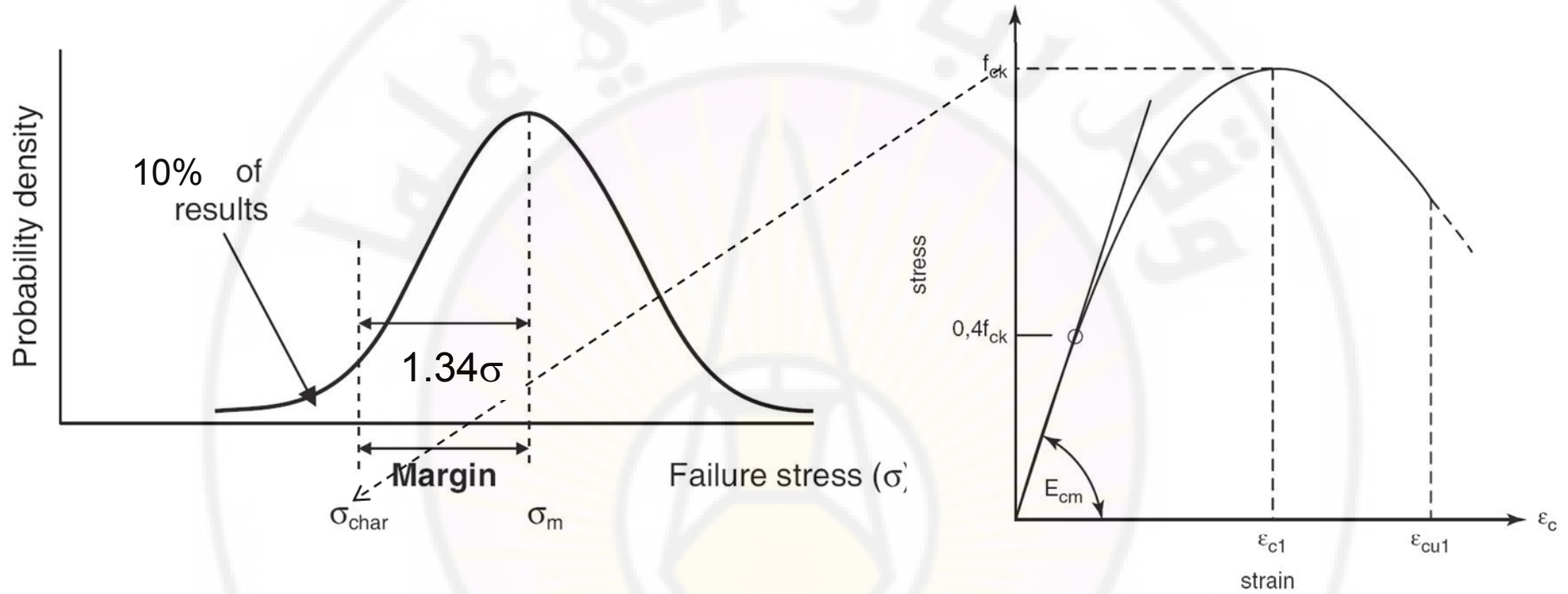
- المقاومة الاسطوانية المتوسطة Average compressive strength
- نسبة W/C
- الحصىات الخشنة (البحص) (القطر الأعظمي، الكمية) Coarse aggregate (maximum size and quantity)
- نسبة الهواء المدخل او المحجوز ضمن الخلطة (entrained air or entrapped air)
- قابلية التشغيل Workability
- كمية الماء Water content
- الاسمنت (نوعه، كميته) Cement (type and content)
- الإضافات (الحاجة، معطيات الاستخدام ضمن الخلطة) Admixtures (need and application data)
- الحصىات الناعمة (الرمل) Fine aggregate
- تصحيحات الرطوبة Moisture corrections
- صناعة الخلطات التجريبية Make trial mixes

٤- ١ المقاومة الاسطوانية المتوسطة:

يقوم المهندس الانشائي بالحسابات الانشائية على أساس قيمة مقاومة اسطوانية مميزة على عمر 28 يوم. ويطلب من مهندس الخلطات، تصميم خلطة تعطي مقاومة لا تقل عن قيمة الاسطوانية المميزة.

يقوم مهندس المواد بتصميم عدة خلطات ، حيث يحصل على مجموعة من المقاومات نتيجة تغير خواص المواد و طريقة الخلط.

يبين الشكل التالي منحني التوزيع الطبيعي لمجموعة نتائج مقاومات الخلطات.



يبين منحني التوزيع الطبيعي ، أن المقاومة الاسطوانية المتوسطة تزيد عن المقاومة الاسطوانية المميزة ب 1.34σ .

تسمح المواصفات ACI322, ACI318 بأن تكون نسبة 10% من نتائج المقاومات أصغر من قيمة المقاومة المميزة.

يتم حساب الانحراف المعياري من العلاقة التالية:

$$\sigma = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1} \right)^{1/2} \quad \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

حيث: σ : الانحراف المعياري

$\bar{X}$: المتوسط الحسابي لعدد n من التجارب.

X_i : قيمة المقاومة الاسطوانية للتجربة الواحدة.

n : عدد التجارب.

نرمز للمقاومة المميزة الاسطوانية بـ f_c

نرمز للمقاومة الاسطوانية المتوسطة بـ f_{cr}

يتم حساب قيمة المقاومة الاسطوانية المتوسطة من احدى العلاقتين التاليتين ،حيث يتم اختيار المقاومة الأكبر:

$$f'_{cr} = f'_c + 1.34\sigma$$

$$f'_{cr} = f'_c + 2.33\sigma - 3.45$$

١. يتم استخدام هاتين المعادلتين عندما يكون عدد التجارب أكبر من 30 تجرية أو عندما تتوافر معطيات إحصائية كافية

٢. أما إذا كان عدد التجارب أقل من ثلاثين (يتراوح بين 15-30) فيجب ضرب معامل الانحراف المعياري بمعامل، يؤخذ من الجدول رقم 1 .

جدول ١

Number of Tests	Modification Factor F
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 or more	1.00

بعد تصحيح قيمة الانحراف المعياري ، نقوم بالعودة للمعادلتين الأساسيتين لإيجاد المقاومة الاسطوانية المتوسطة.

٣. إذا كان عدد التجارب أقل من 15 او لا يوجد اية معطيات إحصائية سابقة فإنه يتم حساب المقاومة الاسطوانية المتوسطة مباشرة من الجدول رقم 2

جدول ٢

Specified Compressive Strength f'_c , MPa (psi)	Required Average Compressive Strength f'_{cr} , MPa (psi)
<21 (<3000)	$f'_c + 7.0 (f'_c + 1000)$
21 to 35 (3000 to 5000)	$f'_c + 8.5 (f'_c + 1200)$
>35 (>5000)	$f'_c + 10.0 (f'_c + 1400)$

مثال:

إذا كانت المقاومة الاسطوانية المميزة على عمر 28 يوما تعادل 31MPa ، يُطلب حساب المقاومة الاسطوانية المتوسطة في الحالات التالية:

١. مجبل جديد و لا يوجد معطيات إحصائية سابقة (الانحراف المعياري غير محدد).
٢. مجبل جديد و الانحراف المعياري $\sigma=3.6\text{MPa}$ لأجل عدد من التجارب يعادل 17 تجربة.
٣. مجبل قديم في انتاج الخلطات الخرسانية و يوجد معلومات إحصائية لعدد من التجارب يزيد عن 30 تجربة ، الانحراف المعياري $\sigma=2.4\text{MPa}$
٤. مجبل قديم في انتاج الخلطات الخرسانية و يوجد معلومات إحصائية لعدد من التجارب يزيد عن 30 تجربة ، الانحراف المعياري $\sigma=3.8\text{MPa}$.

٤- ٢ نسبة الماء الى الاسمنت W/C:

جدول ٣ Typical Relationship Between Water-Cement Ratio and Compressive Strength of Concrete*

Compressive Strength at 28 days, f'_c , MPa (psi)**	Water-Cement Ratio by Weight	
	Non-Air-Entrained Concrete	Air-Entrained Concrete
48 (7000)	0.33	—
41 (6000)	0.41	0.32
35 (5000)	0.48	0.40
28 (4000)	0.57	0.48
21 (3000)	0.68	0.59
14 (2000)	0.82	0.74

*American Concrete Institute (ACI 211.1 and ACI 211.3)

**Strength is based on cylinders moist-cured 28 days in accordance with ASTM C31 (AASHTO T23). Relationship assumes nominal maximum size of aggregate about 19 to 25 mm ($3/4$ to 1 in.).

تُحسب من الجدول رقم 3 مع الانتباه لاستخدام مولدات الفقاعات الهوائية او عدمه ، ثم تقارن القيم الناتجة مع القيم العظمى لنسبة الماء الى الاسمنت الواردة في الجدولين 5 , 4 حيث تؤخذ القيمة الأصغر.

جدول ٤

Exposure condition	Maximum water-cementitious material ratio by mass for concrete	Minimum design compressive strength, f'_c , MPa (psi)
Concrete protected from exposure to freezing and thawing, application of deicing chemicals, or aggressive substances	Select water-cementitious material ratio on basis of strength, workability, and finishing needs	Select strength based on structural requirements
Concrete intended to have low permeability when exposed to water	0.50	28 (4000)
Concrete exposed to freezing and thawing in a moist condition or deicers	0.45	31 (4500)
For corrosion protection for reinforced concrete exposed to chlorides from deicing salts, salt water, brackish water, seawater, or spray from these sources	0.40	35 (5000)

Adapted from ACI 318 (2002).

جدول ٥

Sulfate exposure	Water-soluble sulfate (SO_4) in soil, percent by mass*	Sulfate (SO_4) in water, ppm*	Cement type**	Maximum water-cementitious material ratio, by mass	Minimum design compressive strength, f'_c , MPa (psi)
Negligible	Less than 0.10	Less than 150	No special type required	—	—
Moderate†	0.10 to 0.20	150 to 1500	II, MS, IP(MS), IS(MS), P(MS), I(PM)(MS), I(SM)(MS)	0.50	28 (4000)
Severe	0.20 to 2.00	1500 to 10,000	V, HS	0.45	31 (4500)
Very severe	Over 2.00	Over 10,000	V, HS	0.40	35 (5000)

* Tested in accordance with the Method for Determining the Quantity of Soluble Sulfate in Solid (Soil and Rock) and Water Samples, Bureau of Reclamation, Denver, 1977.

** Cement Types II and V are in ASTM C 150 (AASHTO M 85), Types MS and HS in ASTM C 1157, and the remaining types are in ASTM C 595 (AASHTO M 240). Pozzolans or slags that have been determined by test or service record to improve sulfate resistance may also be used.

† Seawater.

٤- ٣ متطلبات الحصويات الخشنة (البحص):

يجب ان يتوافر لدينا التحليل الحبي للحصويات الخشنة و كذلك طبيعة هذه الحصويات (شكلها، بنية سطحها، نفوذيتها).
تشمل متطلبات الحصويات الخشنة، تحديد قطرها الأعظمي و حاب الحجم الركامي (الكتلي) لها.

٤- ٣- ١ متطلبات القطر الأعظمي للبحص

يجب ان يحقق القطر الأعظمي الاشتراطات التالية:

١. القطر الأعظمي للبحص $\geq 1/5$ البعد الأصغر بين جوانب القالب.
٢. القطر الأعظمي للبحص $\geq 3/4$ المسافة الصافية بين قضبان التسليح.
٣. القطر الأعظمي للبحص $\geq 3/4$ المسافة الصافية بين قضبان التسليح و سطح القالب (طبقة التغطية).
٤. القطر الأعظمي للبحص $\geq 1/3$ سماكة البلاطة (البلاطات غير المسلحة، الأرضيات).

٤- ٣- ٢ الحجم الركامي (الكلي) للبحص Bulk volume of CA

يُحسب من الجدول رقم 6 و ذلك بعد معرفة القطر الأسمي الأعظمي للحصويات و معامل النعومة للرمل. ثم يُستخدم في حساب وزن البحص الجاف بعد معرفة الوزن الحجمي الركامي الجاف للبحص.

ملاحظات:

- يمكن زيادة حجم البحص بمقدار 10% عندما نريد الحصول على قابلية تشغيل أقل (انشاء الطرق).
- يمكن انقاص حجم البحص بمقدار 10% عندما نريد الحصول على قابلية تشغيل أكبر (الصب باستخدام المضخات).

جدول ٦

Nominal maximum size of aggregate, mm (in.)	Bulk volume of dry-rodded coarse aggregate per unit volume of concrete for different fineness moduli of fine aggregate*			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 (3/8)	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2)	0.59	0.57	0.55	0.53
19 (3/4)	0.66	0.64	0.62	0.60
25 (1)	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 1/2)	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2)	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3)	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6)	0.87	0.85	0.83	0.81

*Bulk volumes are based on aggregates in a dry-rodded condition as described in ASTM C 29 (AASHTO T 19). Adapted from ACI 211.1.

٤-٤ نسبة الفراغات الهوائية

يتم استخدام مولدات الفقاعات الهوائية ضمن الخلطات الخرسانية عند وجود خطر تعرضها لدورات متتالية من التجمد و الذوبان أو أملاح الإذابة. بالإضافة لذلك فإن استخدام مولدات الفقاعات الهوائية ساهم في تحسين قابلية التشغيل.

يتم حساب نسبة الفراغات الهوائية من الجدول رقم ٧ وفقاً للقطر الأعظمي للحصويات.

جدول ٧

Slump, mm	Water, kilograms per cubic meter of concrete, for indicated sizes of aggregate*							
	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm**	75 mm**	150 mm**
Non-air-entrained concrete								
25 to 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 to 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 to 175	243	228	216	202	190	178	160	—
Approximate amount of entrapped air in non-air-entrained concrete, percent	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Air-entrained concrete								
25 to 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 to 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 to 175	216	205	197	184	174	166	154	—
Recommended average total air content, percent, for level of exposure:†								
Mild exposure	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Moderate exposure	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Severe exposure	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

٤-٤-١ حالات التعرض لخطر التجمد و الذوبان

١. **حال التعرض اللطيف (الخفيف) Mild exposure :** في هذه الحالة يكون خطر التعرض لدورات التجمد و الذوبان ضعيف جداً، و بالتالي لا حاجة لاستخدام مولدات الفقاعات الهوائية. اذا ما تم استخدامها فيكون الهدف هو تحسين قابلية التشغيل.

٢. **حالة التعرض المعتدل (المتوسط) Moderate exposure :** في هذه الحالة لا تتعرض الخرسانة للرطوبة لفترات طويلة قبل عملية التجمد و كذلك لا تتعرض للأملاح و المواد الكيميائية الضارة . مثال : الجدران، الاعمدة، الجوائز التي ليست على اتصال مباشر مع التربة الرطبة و لا تتلقى بشكل مباشر املاح الاذابة.

٣. **حال التعرض الشديد severe exposure :** في هذه الحالة تكون الخرسانة مشبعة نتيجة تماسها المباشر مع التربة الرطبة او مع الماء قبل حدوث التجمد. كما تتعرض الخرسانة لأملح الاذابة و المواد الكيميائية الضارة (كلور-كبريتات)

ملاحظات :

- عند ثبات كمية الماء فان استخدام مولدات الفقاعات الهوائية ستؤدي الى زيادة الهبوط .
- عند ثبات الهبوط فان استخدام مولدات الفقاعات الهوائية سيؤدي الى تخفيض نسبة الماء، فمثلا : ان زيادة محتوى الهواء بمقدار 1% تؤدي الى نقصان كمية الماء بمقدار 3Kg ، و العكس صحيح.
- يتم التعامل مع نسبة الهواء المطلوبة من خلال مجال يحوي القيمة الهدف المحددة ضمن الجدول، هذا المجال ينقص عن القيمة الهدف ب(1) و يزيد ب (2) عن القيمة الهدف. فمثلا من أجل القيمة الهدف التي تساوي 6 يكون مجال العمل هو (5-8) .

٤- ٥ قابلية التشغيل (الهبوط بمخروط ابرامز):

- يُعتبر مقدار الهبوط بمخروط ابرامز معيارا لقياس قوام الخلطة الخرسانية الطرية.
- تُحدد قيم الهبوط من الجدول رقم ٨ وفقا لنوع العنصر الانشائي.
- عندما نريد ضبط معايير الخلطة ، فانه يمكن زيادة مقدار الهبوط بمقدار 10mm عن طريق إضافة 2kg من الماء لكل 1m³ من الخرسانة.

جدول ٨

Concrete construction	Slump, mm (in.)	
	Maximum*	Minimum
Reinforced foundation walls and footings	75 (3)	25 (1)
Plain footings, caissons, and substructure walls	75 (3)	25 (1)
Beams and reinforced walls	100 (4)	25 (1)
Building columns	100 (4)	25 (1)
Pavements and slabs	75 (3)	25 (1)
Mass concrete	75 (3)	25 (1)

٤- ٦ كمية الماء :

تتأثر كمية الماء بالعوامل التالية:

- أبعاد الحصويات و شكلها و بنية سطحها.
- مقدار الهبوط .
- نسبة W/C .
- نسبة الفراغات الهوائية.
- نوع المواد الرابطة الاسمنتية.
- الاضافات

- يتم الحصول على كمية الماء اللازمة للخلطة من الجدول رقم ٧ وذلك لحصويات خشنة (بحص) مكسرة، ذات حواف حادة و جافة.

- يتم تخفيض القيم الواردة في الجدول رقم ٧ بمقدار **12Kg** عندما تكون الحصويات الخشنة مكسرة ذات حواف قريبة من الحادة، و تخفض كمية الماء بمقدار **21Kg** عندما تكون الحصويات الخشنة طبيعية ملساء مع القليل من الحصويات المكسرة، و تخفض كمية الماء بمقدار **27kg** عندما تكون الحصويات الخشنة طبيعية ملساء و مدورة تماماً.
ملاحظات :

- ان زيادة ابعاد الحصويات و زيادة نسبة الفراغات الهوائية، و انخفاض النسبة **W/C** و انخفاض مقدار الهبوط، و استخدام حصويات خشنة مدورة و الإضافات المخفضة للماء، تؤدي الى تخفيض الحاجة للماء (تقليل كمية الماء اللازمة للخلط).

- بالمقابل فان زيادة درجة الحرارة، و زيادة كمية الاسمنت و زيادة مقدار الهبوط و النسبة **W/C** و استخدام الحصويات ذات الحواف الحادة تؤدي الى زيادة الحاجة للماء (زيادة كمية الماء اللازمة للخلط).

٤- ٧ كمية المواد الاسمنتية و نوعها :

- يتم حسابها من خلال النسبة **W/C** (مرحلة رقم ٢) ، بالإضافة الى أن كمية الماء أصبحت معروفة (مرحلة رقم ٦)

- يجب ان لا تقل قيمة **C** المحسوبة عن مايلي:

١. في حالة التعرض الشديد لدورات التجمد و املاح الازابة فان كمية الاسمنت يجب ان لا تقل عن 334kg/m^3 أي $C \geq 334\text{kg/m}^3$ و النسبة **W/C** يجب ان لا تتجاوز القيم العظمى المحددة في الجدولين ٤ و ٥ .

٢. في حالة صب الخرسانة تحت الماء: فان $C \geq 385\text{kg/m}^3$ ، $W/C \leq 0.45$.

٣. الأرضيات و بلاطات الأرصفة و غيرها من الاعمال المسطحة: فان كمية الاسمنت يجب ان لا تقل. عما هو وارد في الجدول رقم ٩

جدول رقم ٩

Nominal maximum size of aggregate, mm (in.)	Cementing materials, kg/m ³ (lb/yd ³)*
37.5 (1½)	280 (470)
25 (1)	310 (520)
19 (¾)	320 (540)
12.5 (½)	350 (590)
9.5 (¾)	360 (610)

٤- ٨ الإضافات الاسمنتية (المنيرالية) و البيتونية (الكيميائية):

تُعطى الإضافات كنسبة مئوية من كمية الاسمنت و بالتالي فانه يمكن حساب كميتها وفقا للنسبة المعطاة .
الإضافات الاسمنتية مثل (الرماد المتطاير، هباب السيليس...) و الإضافات البيتونية مثل (مولدات الفقاعات الهوائية، الملدنات، مخفضات الماء، المسرعات،)

٤- ٩ حساب وزن الرمل:

يُحسب وزن الرمل بالاعتماد على طريقة الحجوم المطلقة (بالنسبة للحصويات تشمل حجمها فقط دون الفراغات فيما بينها).

حجم الخلطة الخرسانية = 1m³ = مجموع الحجوم المطلقة لمكوناتها و التي تشمل (الاسمنت، الماء ، البحص، الرمل، الفراغات الهوائية، الإضافات). من خلال المراحل السابقة تمت معرفة كمية كافة المواد ما عدا الرمل و بالتالي نقوم بحساب الحجم المطلق لكل مادة.

و بالتالي فإن الحجم المطلق للرمل = 1 - مجموع الحجوم المطلقة للمواد المحددة مسبقاً
يُحسب الحجم المطلق لكل مادة من العلاقة التالية:

$$\text{Absolute volume} = \frac{\text{weight of losse material}}{\text{relative density (specific gravity) of a material} * \text{density of water}}$$

بعد معرفة الحجم المطلق للرمل ، يمكن حساب وزنه من نفس قانون الحجم المطلق:

$$\text{weight of losse material} = \text{absolute volume} * \text{specific gravity of a material} * \text{density of water}$$

في نهاية هذه المرحلة نكون قد حصلنا على اوزان الحصىات وهي بالحالة الجافة بالفرن و الماء و الاسمنت و الإضافات. ان استخدام الحصىات ضمن الخلطة الخرسانية و هي بحالة التجفاف بالفرن أمر نادر الحدوث ، فالحصىات تورد و هي تحتوي على نسب رطوبة معينة، لذلك لا بد من اجراء تصحيحات الرطوبة.

ملاحظة:

الاوزان النوعية لبعض المواد:

• الاسمنت البورتلندي 3.15 - الحصىات 2.4-2.9

• الاسمنت المخلوط 2.9-3.15

• الرماد الطائر (المتطاير) 1.9-2.8

• الخبث 2.85-2.95 - هباب السيليس 2.25

كثافة الماء في الدرجة +4°C تعادل 1000Kg/m³ .

٤- ١٠ تصحيحات الرطوبة:

نصح أوزان البحص و الرمل بالاعتماد على نسبة رطوبة كل منها ، كما نصح كمية الماء بالاعتماد على رطوبة الحصىات و تشربها، حيث ان الماء الحر المتواجد على سطح الحصىات يمكن ان يساهم في ماء الجبل، كما ان الحصىات يمكن ان تأخذ ماءً من ماء الجبل في حال كانت رطوبتها اقل من تشربها.

مثال ١:

يُطلب تصميم خلطة خرسانية وفقاً ل ACI 211.1 باستخدام طريقة الحجم المطلقة وفقاً لمايلي:

المتطلبات التصميمية: الخلطة سوف تُستخدم في صب ركيزة جسر معرض بشكل شديد لدورات التجمد و الذوبان و لأملاح الإذابة ، المقاومة الاسطوانية المميزة تساوي 24.1MPa ، الاشتراطات البعدية: البعد الاصغري بين جوانب القالب يساوي 0.3m ، المسافة الصافية الدنيا بين قضبان التسليح تساوي 64mm ، و سماكة طبقة التغطية الدنيا تساوي 64mm . الانحراف المعياري للمقاومة على الضغط يساوي 2.4MPa ، العدد الكلي للتجارب يزيد عن ثلاثون تجربة.

المواد المتوفرة: الاسمنت من النوع V ، تُستخدم مولدات الفقاعات الهوائية وفقاً لمايلي $6.3\text{ml}/1\%/100\text{Kg}$ ، of cement

البحص: القطر الأعظمي للحصىات 37.5mm ، القطر الأعظمي الاسمي للحصىات 25mm ، البحص نهري مدور، الوزن النوعي الجاف (الكلي) الجاف يساوي 2.621 ، الامتصاص 0.4% ، الرطوبة 1.5% ، الوزن الحجمي الجاف المرصوص يساوي $1681\text{Kg}/\text{m}^3$.

الرمل: رمل طبيعي، الوزن النوعي الجاف (الكلي) يساوي 2.572 ، الامتصاص 0.8% ، الرطوبة 4% ، معامل النعومة 2.6

مثال ٢:

يُطلب تصميم خلطة خرسانية وفقاً لـ ACI 211.1 باستخدام طريقة الحجم المطلقة وفقاً لما يلي:

المتطلبات التصميمية: الخلطة تحوي مولدات الفقاعات الهوائية وسوف تُستخدم في صب عمود خارجي فوق سطح الأرض ، يتعرض لدورات من التجمد و الذوبان بشكل كبير. المقاومة الاسطوانية المميزة على عمر 28 يوماً تعادل 24MPa ، لا تتوافر معطيات إحصائية سابقة، يجب ان يتراوح هبوط مخروط ابرامز بين (50-100) ، و القطر الأعظمي للحصويات يجب أن لا يزيد عن 30mm .

المواد المتوفرة: الاسمنت من النوع I (العادي) ، وزنه النوعي 3.15 .

الحصويات الخشنة (البحص): يتوافر نوعان من البحص ناتجان عن عمليات تحطيم للصخور (حصويات مكسرة)، نسبة خلطهما هي 60:40 (60% من النوع الأول و 40% من النوع الثاني). الكثافة الكتلية (الركامية) (الكلية) الجافة المرصوفة للخليط تعادل 1650Kg/m³ .

خواص البحص من النوع الأول: القطر الأعظمي الاسمي 25mm ، الوزن النوعي الركامي الجاف 2.75 ، التشرب (الامتصاص) 0.7% ، العينة المخبرية المستخدمة في العينات التجريبية رطوبتها 0.0% .

خواص البحص من النوع الثاني: القطر الأعظمي الاسمي 10mm ، الوزن النوعي الركامي الجاف 2.65 ، التشرب (الامتصاص) 0.8% ، العينة المخبرية المستخدمة في العينات التجريبية رطوبتها 0.5% .

الرمل: رمل طبيعي، الوزن النوعي الركامي (الكتلي) (الكلي) يساوي 2.6 ، الامتصاص 1% ، العينة المخبرية المستخدمة في العينات التجريبية رطوبتها 3.0% ، معامل النعومة 2.8

٥- حالات خاصة:

١- حالة الخرسانة ذات الهبوط المنخفض او المعدوم **no slump concrete** هي خرسانة هبوطها يتراوح بين (0-25)mm وتُصنف الى ثلاثة انواع كما في الجدول التالي:

التوصيف	قابلية التشغيل		
	الهبوط mm	زمن الرج sec	عامل الرص
خرسانة جافة الى اقصى حد	-	32-18	-
خرسانة جامدة جدا	-	18-10	0.70
خرسانة جامدة	0-25	10-5	0.75

جدول رقم ١٠ : تصنيف الخرسانة التي قابلية تشغيلها أقل من 25mm

عند تصميم هذ النوع من الخلطات الخرسانية ، نتبع نفس خطوات التصميم السابقة مع اجراء تعديلين :

- **التعديل الأول:** يرتبط بكمية الماء حيث يتم اعتبار القيم الواردة في الجدول (7) الموافقة لهبوط يتراوح بين (75-100)mm كقيم مرجعية (تمثل النسبة المئوية 100%) ومن ثم يتم حساب كمية الماء للخلطات الخرسانية المنخفضة الهبوط وفقا للنسب المئوية المبينة في الجدول (11).
- **التعديل الثاني:** يرتبط بالحجم الكلي للحصويات الوارد بالجدول (6) حيث يتم ضرب القيم الواردة فيه بعوامل التصحيح الواردة في الجدول (12)

التوصيف	كمية الماء كنسبة مئوية من القيمة المرجعية %
خرسانة جافة الى اقصى حد	78
خرسانة جامدة جدا	83
خرسانة جامدة	88
خرسانة لدنة (المرجعية)	100
خرسانة سائلة	106

جدول رقم ١١ : نسبة تعديل كمية الماء في حالة الخرسانة التي هبوطها اقل من 25mm وفي حالة الخرسانة السائلة

التوصيف	عوامل التصحيح للحجم الكلي للحصويات الخشنة وفقا للقطر الاعظمي الاسمي				
	40mm	25mm	20mm	12.5mm	9.5mm
خرسانة جافة الى اقصى حد	1.30	1.40	1.45	1.70	1.90
خرسانة جامدة جدا	1.25	1.25	1.30	1.45	1.60
خرسانة جامدة	1.15	1.15	1.15	1.30	1.35
خرسانة لدنة (المرجعية)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
خرسانة سائلة	1.00	1.00	1.00	0.98	0.97

جدول رقم ١٢ عوامل تصحيح الحجم الكلي للحصويات الخشنة وفقا للقطر الاعظمي الاسمي في الخرسانة التي قابلية تشغيلها اقل من 25mm

ملاحظة: في الجدول السابقين تظهر في السطر الأخير منهما نسبة الماء و معامل التصحيح للحجم الكلي للحصويات الخشنة الخاصة بالخرسانة السائلة.

٢- حالة الخرسانة السائلة **flowing concrete**

تُعرف الخرسانة وفقاً للمواصفة ASTM C1017 على أنها الخرسانة التي هبوطها يزيد عن 190mm ويكون تماسكها طبعياً.

عموماً: الخرسانة السائلة يكون هبوطها أكثر من 200mm أو قطر جريانها بين (510-620)mm أو عامل رصها يتراوح بين (0.96-0.98) .

يتم تصميم خلطة الخرسانة السائلة كخلطة عادية ذات هبوط يعادل 75mm و من ثم تتم إضافة الملدنات للحصول على الهبوط العالي المرغوب. كما انه يجب استبعاد الحصويات الخشنة جداً و الحصويات المتطاولة و الحصويات المسطحة من خلطات الخرسانة السائلة.

تلعب الحصويات الناعمة دوراً مهماً في تماسك الخلطات الخرسانة السائلة ، لذلك نقوم بزيادة نسبتها بمقدار 5% و بنفس المقدار نقوم بتخفيض الحصويات الخشنة.

مثال ٣:

تم تصميم خلطة خرسانية بطريقة الحجم المطلقة وفقا ل **ACI 211.1** ، لتؤمن المعطيات التالية: مقاومة مميزة بالضغط على عمر 28 يوما تعادل **31MPa** ، هبوط مخروط ابرامز **75mm** ، نسبة الفراغات الهوائية (القيمة التصميمية) **7%** ، فكانت كميات المواد اللازمة لإنتاج خلطة حجمها يعادل **1m³** كما يلي:

كمية الماء الواجب اضافتها **83kg** ، كمية الاسمنت **435kg** ، كمية الحصىيات الخشنة (البحص) برطوبتها **1093kg** (رطوبة الحصىيات الخشنة **2%** ، تشربها **0.5%** ، وزنها النوعي الكلي الجاف **2.68**) ، كمية الحصىيات الناعمة (الرمل) **719kg** (رطوبة الرمل **6%** ، تشربه **0.7%** ، وزنه النوعي الكلي الجاف **2.64**) ، نسبة **W/C=0.31** .

عند تنفيذ الخلطة المخبرية التي حجمها **0.1m³** من المواد السابقة، كانت النتائج كما يلي: هبوط مخروط ابرامز **100mm** ، نسبة الفراغات الهوائية **8%** ، كثافة الخرسانة الطرية (وزنها الحجمي) **2274 kg/m³** . يُطلب إعادة ضبط مكونات الخلطة الخرسانية التي حجمها **1m³** بحيث تحقق الشروط التصميمية المطلوبة.

٦- اختبارات الخرسانة الطرية

الخرسانة الطرية هي الخرسانة التي تبدأ من لحظة إضافة الماء الى مكونات الخرسانة الجافة و حتى لحظة حدوث زمن الاخذ الاول و تمتاز هذه المرحلة بالقدرة على الخلط، و النقل، و الصب.

تُجرى على الخرسانة الطرية الاختبارات التالية:

٦- ١ اختبارات قابلية التشغيل

تشمل هذه الاختبارات هبوط المخروط، عامل الرص، و **Vebe test** و قد شرح هذه الاختبارات مسبقا

٦- ٢ اختبار تحديد كثافة الخرسانة الطرية

يُجرى هذا الاختبار عن طريق ملء أسطوانة معدنية معروفة الحجم و معروف وزنها فارغة، بالخرسانة الطرية و من ثم وزنها وهي مملوءة بالخرسانة، فتكون كثافتها هي :

$$D = \frac{m1 - m2}{v}$$

حيث:

m1 : وزن الأسطوانة مملوءة بالخرسانة الطرية kg .

m2 : وزن الأسطوانة فارغة kg .

V : حجم الأسطوانة m³ .

D : كثافة الخرسانة الطرية kg/m³

٦- ٣ اختبار تحديد نسبة الهواء ضمن الخرسانة الطرية

يوجد ثلاثة طرق لتحديد نسبة الهواء ضمن الخرسانة الطرية وهي:

١. عن طريق الكثافة الطرية.

٢. الطريقة الحجمية

٣. عن طريق الضغط

$$D = \frac{m1 - m2}{v}$$

حيث:

m1 : وزن الأسطوانة مملوءة بالخرسانة الطرية kg .

m2 : وزن الأسطوانة فارغة kg .

V : حجم الأسطوانة m³ .

D : كثافة الخرسانة الطرية kg/m³

٧ ضبط الجودة للخرسانة الطرية:

يهدف هذا الاختبار لتحديد المكونات الفعلية الموجودة ضمن الخرسانة الطرية.

جداول مقرر تكنولوجيا الخرسانة – د.محمود اسماعيل – يسمح بإدخالها إلى الامتحان.

عدد التجارب <i>Number of Tests</i>	معامل التصحيح <i>Modification Factor F</i>
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 or more	1.00

جدول 1 : عوامل تصحيح الانحراف المعياري

المقاومة الأسطوانية المميزة على الضغط <i>Specified Compressive Strength f_c (MPa)</i>	المقاومة الأسطوانية المتوسطة على الضغط <i>Required Average Compressive Strength f_{cr} (MPa)</i>
< 21	$f_c + 7.0$
21 to 35	$f_c + 8.5$
> 35	$f_c + 10.0$

جدول 2 : حساب المقاومة الأسطوانية المتوسطة

المقاومة الأسطوانية المتوسطة بعمر 28 يوم <i>Compressive Strength at 28 days f_{cr} (MPa)</i>	نسبة الماء إلى الاسمنت (w/c) <i>Water - Cement Ratio by Weight</i>	
	بدون مولدات فقاعات هوائية <i>Non - Air - Entrained Concrete</i>	مع مولدات فقاعات هوائية <i>Air - Entrained Concrete</i>
48	0.33	—
41	0.41	0.32
35	0.48	0.40
28	0.57	0.48
21	0.68	0.59
14	0.82	0.74

جدول 3 : العلاقة بين المقاومة على الضغط ونسبة الماء إلى الاسمنت (w/c)

ظروف التعرض <i>Exposure Conditions</i>	قيمة w/c العظمى <i>Maximum water – cementitious material ratio by mass for concrete</i>	مقاومة الضغط التصميمية الدنيا <i>Minimum design compressive strength</i> $f_{cr}(MPa)$
الخرسانة محمية من التعرض لدورات التجمد والذوبان وأملاح الإذابة. <i>Concrete protected from exposure to freezing and thawing, application of deicing chemicals, or aggressive substances.</i>	تُختار نسبة $\frac{w}{c}$ اعتماداً على المقاومة، قابلية التشغيل ومتطلبات الإنهاء. <i>Select water – cementitious material ratio on basis of strength, workability, and finishing needs.</i>	تُختار المقاومة اعتماداً على المتطلبات الإنشائية <i>Select strength based on structural requirements</i>
يُطلب من الخرسانة أن تكون النفوذية قليلة عند التعرض للماء. <i>Concrete intended to have low permeability when exposed to water.</i>	0.50	28
الخرسانة معرضة لدورات التجمد والذوبان أو وأملاح الإذابة. <i>Concrete exposed to freezing and thawing in a moist condition or deicers.</i>	0.45	31
حماية حديد التسليح من التآكل نتيجة التعرض للكلور من أملاح الإذابة أو من الأملاح الموجودة في المياه المالحة أو مياه البحر. <i>For corrosion protection for reinforced concrete exposed to chlorides from deicing salts, salt water, brackish water, seawater, or spray from these sources.</i>	0.40	35

جدول 4 : القيم العظمى لنسبة الماء إلى الاسمنت وفقاً لظروف التعرض

التعرض للكبريتات <i>Sulfate exposure</i>	التعرض للكبريتات كنسبة مئوية <i>Water soluble sulfate (SO₄) in soil percent by mass</i>	تركيز الكبريتات كعدد جزيئات <i>sulfate (SO₄) in water, ppm</i>	نوع الاسمنت <i>Cement type</i>	قيمة w/c العظمى <i>Maximum water cementitious material ratio by mass</i>	مقاومة الضغط التصميمية الدنيا <i>Minimum design compressive strength</i> $f_{cr}(MPa)$
مهملاً <i>Negligible</i>	Less than 0.10	Less than 150	لا يوجد نوع خاص مطلوب <i>No special type required</i>	—	—
متوسط <i>Moderate</i>	0.10 to 0.2	150 to 1500	II, MS, IP(MS), IS(MS), P(MS), I(PM)(MS), I(SM)(MS)	0.50	28
شديد <i>Severe</i>	0.20 to 2.00	1500 to 10000	V, HS	0.45	31
شديد جداً <i>Very severe</i>	Over 2.00	Over 10000	V, HS	0.4	35

جدول 5 : القيم العظمى لنسبة الماء إلى الاسمنت وفقاً لتركيز الكبريتات في التربة أو الماء

القطر الأعظمي الاسمي للحصىات (mm) Nominal maximum size of aggregate (mm)	الحجم الكلي الجاف المطروق للبحص ضمن واحدة الحجم ($1m^3$) من الخرسانة حسب معاملات النعومة للرمل (FM) <i>Bulk volume of dry – rodded coarse aggregate per until volume of concrete for different fineness moduli of fine aggregate</i>				(FM)
	2.40	2.60	2.80	3.00	
9.5	0.5	0.48	0.46	0.44	
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53	
19	0.66	0.64	0.62	0.60	
25	0.71	0.69	0.67	0.65	
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69	
50	0.78	0.76	0.74	0.72	
75	0.82	0.80	0.78	0.76	
150	0.87	0.85	0.83	0.81	

جدول 6 : الحجم الركامي للحصىات الخشنة (البحص) في واحدة الحجم للخلطة الخرسانية

الهبوط (mm) Slump (mm)	كمية الماء بـ Kg ضمن $1 m^3$ من الخرسانة ونسبة محتوى الهواء % <i>Water, kilograms per cubic meter, for indicated sizes of aggregate</i>							
	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm	75 mm	150 mm
	Non – Air – Entrained Concrete خرسانة بدون استخدام مولدات فقاعات هوائية							
25 to 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 to 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 to 175	243	228	216	202	190	178	160	—
النسبة المئوية التقريبية لكمية الهواء المحبوسة ضمن الخرسانة غير المستخدم فيها مولدات الفقاعات الهوائية. <i>Approximate amount of entrapped air in non – air – entrained concrete, percent.</i>	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
	Air – Entrained Concrete خرسانة مع استخدام مولدات فقاعات هوائية							
25 to 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 to 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 to 175	216	205	197	184	174	166	154	—
محتوى الهواء الكلي الموصى به، كنسبة مئوية متوسطة وفقاً لظروف التعرض: <i>Recommended average total air content, percent, for level of exposure:</i>								
Mild Exposure تعرض بسيط (مهمل)	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Moderate Exposure تعرض معتدل	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Severe Exposure تعرض شديد	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

جدول 7 : كمية الماء ونسبة الفراغات الهوائية في الخلطة الخرسانية

العنصر الخرساني <i>Concrete construction</i>	الهبوط (mm)	
	حد أعلى <i>Maximum</i>	حد أدنى <i>Minimum</i>
قواعد وجدران أساسات مسلحة <i>Reinforced foundation walls and footings</i>	75	25
القواعد المصمتة، العناصر الصندوقية، والجدران الإنشائية <i>Plain footings, caissons, and substructure walls</i>	75	25
جوائز وجدران مسلحة <i>Beams and reinforced walls</i>	100	25
أعمدة البناء <i>Building columns</i>	100	25
أرصعة وبلاطات <i>Pavements and slabs</i>	75	25
خرسانة كتلية <i>Mass concrete</i>	75	25

جدول 8 : قيم الهبوط الدنيا والعظمى للخلطات الخرسانية الطرية

القطر الأعظمي الاسمي للحصويات (mm) <i>Nominal maximum size of aggregate (mm)</i>	كمية الاسمنت (kg/m^3) <i>Cementing materials (kg/m^3)</i>
37.5	280
25	310
19	320
12.5	350
9.5	360

جدول 9 : كمية الاسمنت الدنيا في الخلطات الخرسانية المستخدمة في الأرضيات (المسطحات)

قابلية التشغيل			التوصيف
عامل الرص	زمن الرج (sec)	الهبوط (mm)	
—	18 – 32	—	خرسانة جافة إلى أقصى حد
0.70	10 – 18	—	خرسانة جامدة جداً
0.75	5 – 10	0 – 25	خرسانة جامدة

جدول 10 : تصنيف الخرسانة التي قابلية تشغيلها (هبوطها) أقل من 25 mm

كمية الماء كنسبة مئوية من القيمة المرجعية %	التوصيف
78	خرسانة جافة إلى أقصى حد
83	خرسانة جامدة جداً
88	خرسانة جامدة
100	خرسانة لدنة (المرجعية)
106	خرسانة سائلة

جدول 11 : نسبة تعديل كمية الماء في حالة الخرسانة التي هبوطها أقل من 25 mm وفي حالة الخرسانة السائلة

عوامل التصحيح للحجم الكلي للحصويات الخشنة وفقاً للقطر الأعظمي الاسمي					التوصيف
40 mm	25 mm	20 mm	12.5 mm	9.5 mm	
1.30	1.40	1.45	1.70	1.90	خرسانة جافة إلى أقصى حد
1.25	1.25	1.30	1.45	1.60	خرسانة جامدة جداً
1.15	1.15	1.15	1.30	1.35	خرسانة جامدة
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	خرسانة لدنة (المرجعية)
1.00	1.00	1.00	0.98	0.97	خرسانة سائلة

جدول 12 : عوامل تصحيح الحجم الكلي للحصويات الخشنة وفقاً للقطر الأعظمي الاسمي في حالة الخرسانة التي هبوطها أقل من 25 mm وفي حالة الخرسانة السائلة