الاضافات ضمن الخلطات الخرسانية

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

١-الاضافات المينرالية (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 .

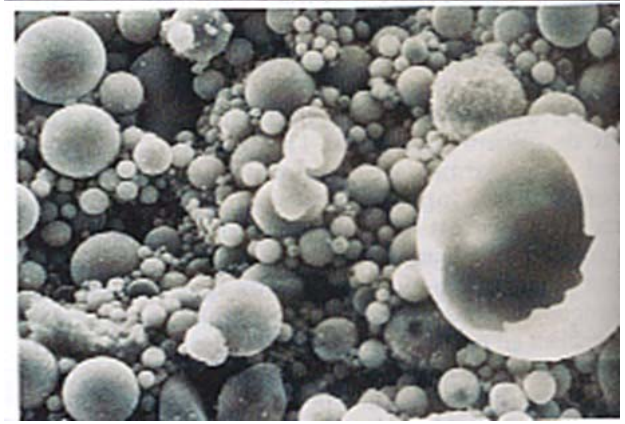
يمكن لهذه المواد ان تُستخدم كمواد مضافة للإسمنت البورتلندي او كمواد استبدال جزئي له و ذلك وفقا للتأثير المطلوب من هذه المواد.

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

١. تبيان 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.

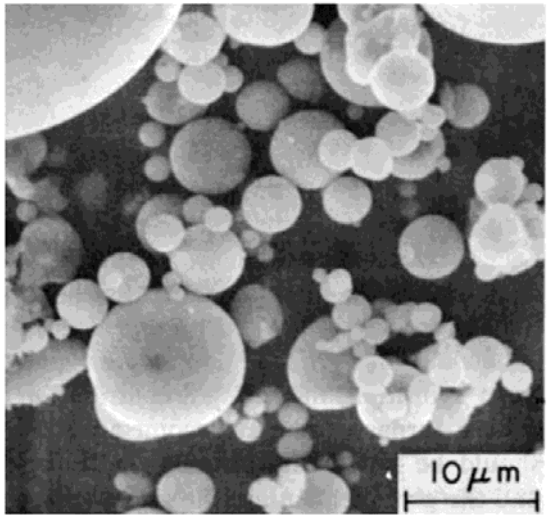
تقليديا يتم استخدام هذه المواد بشكل افرادي ضمن الخرسانة ، إلا انه في الوقت الحاضر و بفضل التعرف بشكل كبير و جيد على خواص هذه المواد، يمكن مزج نوعين (مادتين) من هذه الاضافات أو اكثر لإنتاج خرسانة بمواصفات محددة.



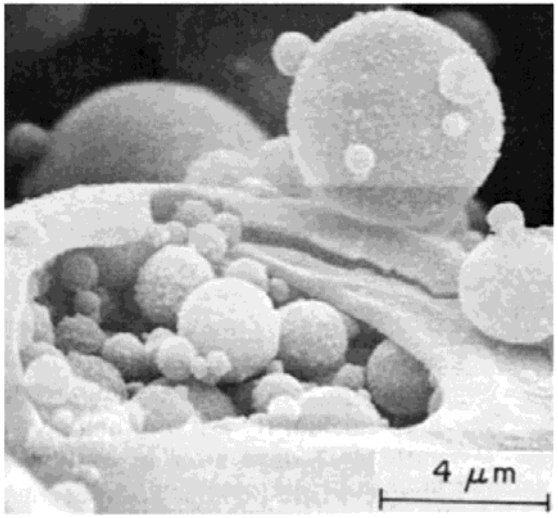
١-١- الرماد الطائر (Cendres volantes – Fly ash) :

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 حبيبيات صلبة، كروية الشكل، كما انه يمكن ان تتواجد بعض الكريات الجوفاء و بعضها الاخر عبارة عن كريات تحوي داخلها كريات صغيرة.



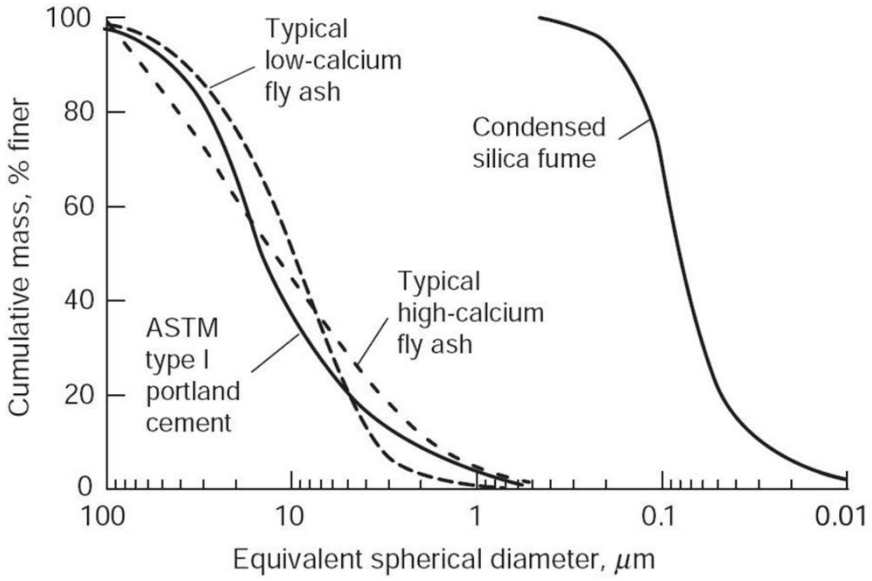
(a)



(b)

تتراوح ابعاد ذرات الرماد المتطاير بين 1-) 100) µm مع بعد نموذجي لمعظم الذرات اقل من 20µm . 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 مرتفعا 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 kg/m^3(540-860). الوزن الحجمي للرماد الطائر المرصوص بشكل جيد بالاهتزاز (متضمناً الفراغات) يتراوح بين kg/m^3(1120-1500).

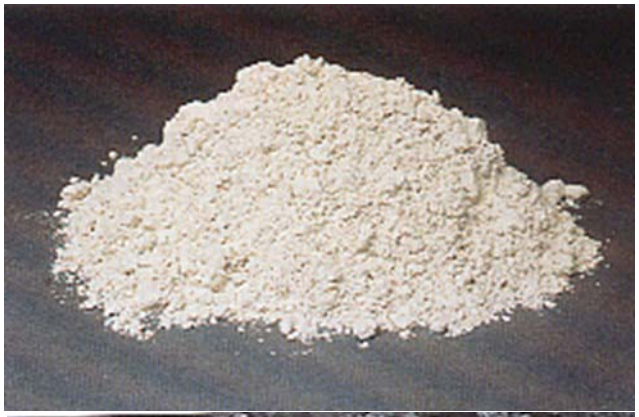
يُعتبر الرماد الطائر مادة رخيصة جداً و هو يتألف بشكل خاص من سيليكات المتزججة الحاوية على أكسيد السيليس، أكسيد الألمنيوم، أكسيد الحديد و أكسيد الكالسيوم و يحتوي كمركبات أقلية أكسيد المغنيزيوم، الكبريت، الصوديوم، البوتاسيوم، الكربون. لون الرماد الطائر بيج او رمادي.

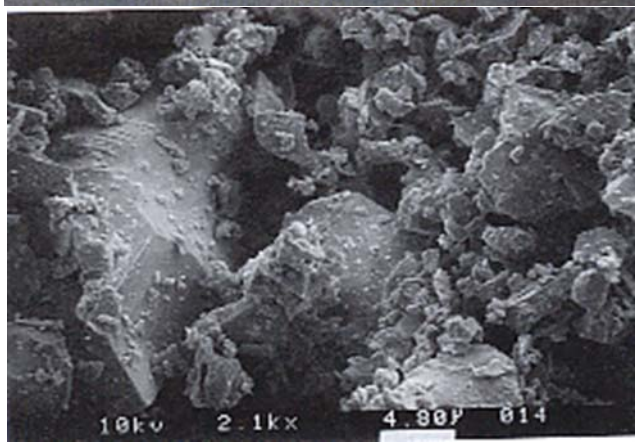
تُصنف المواصفة ASTM C618 الرماد المتطاير بنوعية C و F ، (Class F and Class C) ، كإضافة بوزولانية مستخدمة في الخرسانة.

- 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.

١-٢ الخبث (Laitier -Slag) :





يبين الشكل جانبا صورة للخبث و يسمى ايضاً 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 الأفران 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 45µm .

الوزن النوعي للمادة المطحونة تتراوح بين (2.85-2.95) و وزنها الحجمي يتراوح بين $(1050\text{-}1375)kg/m^3$ و سطحها النوعي (400-600)m^2/kg . تتميه 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 لفعاليته الى ثلاثة اصناف:

١.الصنف 80 (Grade 80)

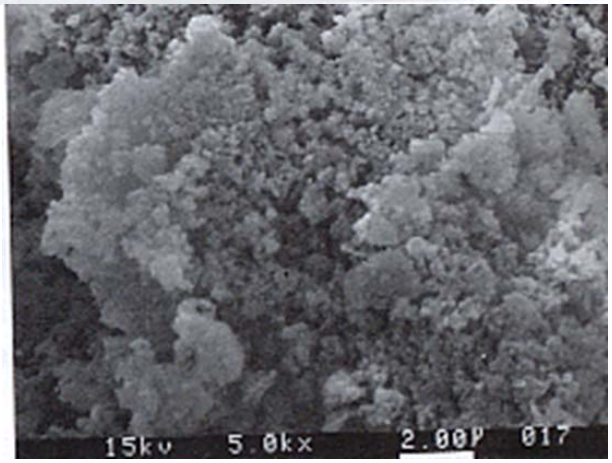
٢.الصنف 100 (Grade 100)

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

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

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



هباب السيليس او المايكروسليس 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 (Sio2) (نسبته أكثر من 85%)، هلامي، غير متبلور . شكل ذراته كروية، ناعمة جداً ، اقطارها أقل من 1µm (القطر الوسطي للذرات 0.1µm و هو أقل من القطر الوسطي لذرات الاسمنت ب 100 مرة)، السطح النوعي للهباب حوالي $20000m^2/kg$ ، وزنه النوعي يتراوح بين 2.20-2.5 ، وزنه الحجمي يتراوح بين $130-430kg/m^3$، من باب المقارنة فقط السطح النوعي لدخان التبغ يبلغ $10000m^2/kg$.

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) :

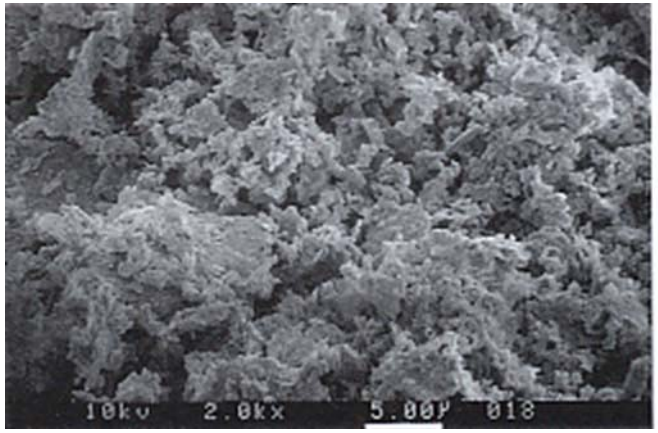
استخدمت البوزولانا الطبيعية منذ آلاف السنين. أما التسمية بوزولانا فهي مشتقة من الرماد البركاني المستخرج من بلدة صغيرة اسمها Pozzouli بجانب مدينة نابولي في إيطاليا عام 79 ميلادي. على اية حال، فان استخدام الرماد البركاني مع الغضار المشوي كمادة ربط في المنشآت المدنية يعود الى 2000 عام قبل الميلاد و ربما اكثر وفقا لبعض الثقافات. ماتزال العديد من المنشآت المصرية، الرومانية ز 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 حراريا في الفرن و من ثم طحنها الى بودرة ناعمة. تتضمن هذه المواد:

- الغضار المشوي Argile calcinée –calcined clay .
- شيست (الطين) المشوي Schiste calciné-calcined shale .
- ميتاكاولين: Métakaolin- metakaolin

الغضار المشوي:



يُعتبر الغضار المشوي المادة الأكثر استخداما 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 يخفض نفوذية الخرسانة.

يتراوح الوزن النوعي للغضار بين (2.4-2.61) ، نعومته تتراوح بين $(650-1350)m^2/kg$.

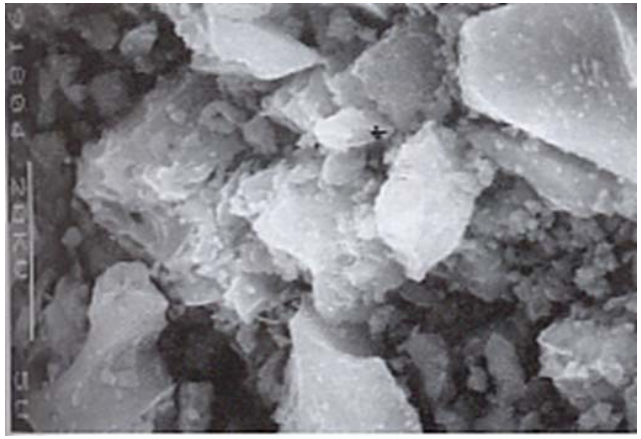
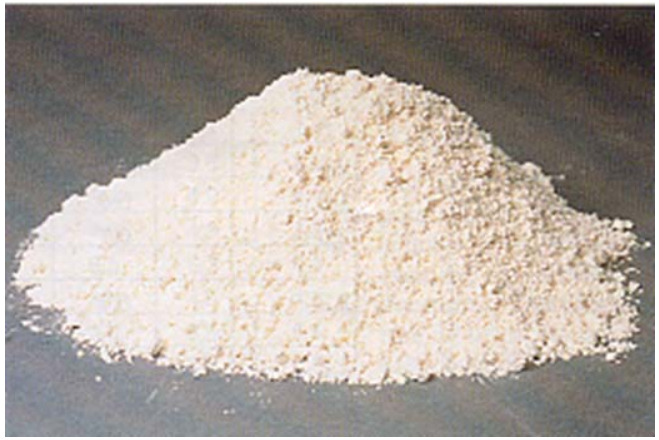


Figure 9.2.8. Calcined shale.

الطين المشوي:

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



الميتاكاولين:

هو نوع خاص من الغضارالمشوي 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 للاسمنت البورتلندي. نسبة اضافتة للاسمنت 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 الوحل المشوي	Metak-aoline الميتاكاولين
SiO_2, %	52	35	35	90	58	50	53
Al_2O_3,%	23	18	12	0.4	29	20	43
Fe_2O_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_2O,%	1.0	5.8	0.3	0.5	0.2	-	0.05
K_2O,%	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

١-٦- 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
هباب 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

٧-١- 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.

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

- تحتاج الخلطات الحاوية على الرماد الطاير 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 إضافة 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 تأثيرا ضئيلا على الحاجة للماء في الخلطات الخرسانية.

٧-١-٢ 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.

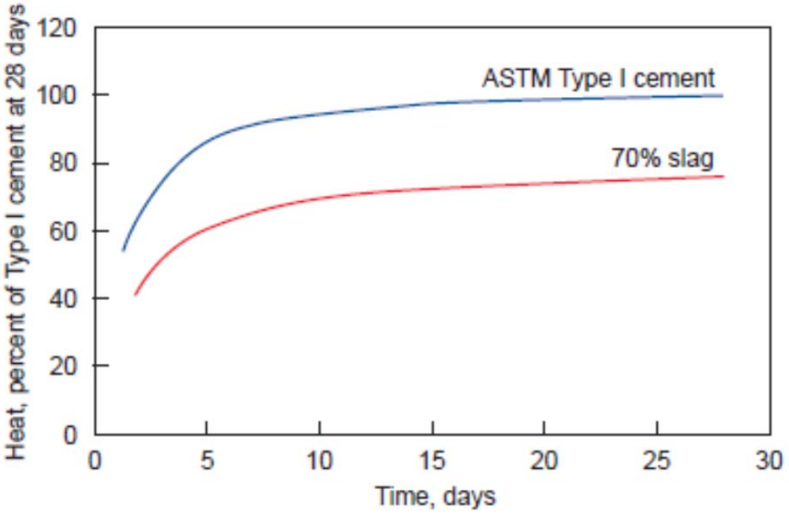
٧-١-٣ تأثير الاضافات الاسمنتية على النضح و الانفصال:

- تبدي الخلطات الخرسانية الحاوية على الرماد المتطاير ميلاً للتقليل من النضح و الانفصال مقارنة بالخلطات العادية. هذا الامر يجعل من استخدام الرماد المتطاير ذو فائدة عملية في الخلطات التي تعاني نقصا في الحصويات الناعمة. يمكن ان يُعزى انخفاض النضح 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 النضح مقارنة بالخلطات العادية، بالمقابل لا يوجد تأثير سلبي على الانفصال. أما اذا كانت نعومة الخبث أكبر من نعومة الاسمنت البورتلندي فانه يخفض النضح.
- يُعتبر هباب السيليس فعال جدا في تخفيض النضح و الانفصال و بالتالي إمكانية استخدام خلطات ذات هبوط عالي دون خطر حدوث الانفصال و النضح.
- لا يُظهر الغضار المشوي، الطين المشوي، و الميتاكاولين تأثيرا واضحا على النضح.

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

- ان كمية مولدات الفقاعات الهوائية التي نحتاجها لتامين نسبة محددة من الهواء ضمن الخلطات الخرسانية، تزداد عند استخدام الرماد المتطاير ضمن الخلطة .
- بالمقابل فان تاثير الخبث على نسبة مولدات الفقاعات ضمن الخلطات الخرسانية هو تأثير متغير.
- يمتلك هباب السيليس تاثيراً 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 الاضافات 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.

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

٧-١-٦ تأثير الاضافات الاسمنتية على أزمنة الاخذ:

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

٧-١-٧ تأثير الاضافات 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 يُصعّب عمية الانهاء للخلطة

٧-١-٨ تأثير الاضافات 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 الاضافات 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.

٧-١-١٠تأثير الاضافات 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 الاضافات

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

٨-١-١ تأثير الاضافات 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 امرا إيجابيا في حالة الخرسانة الكتلية حيث ان المنشآت الكتلية لا تُوضع بالخدمة الكلية مباشرة، كما أن هذا التطور البطيء للمقاومة يُعتبر أمراً مفيدا 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، فمثلا 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 .

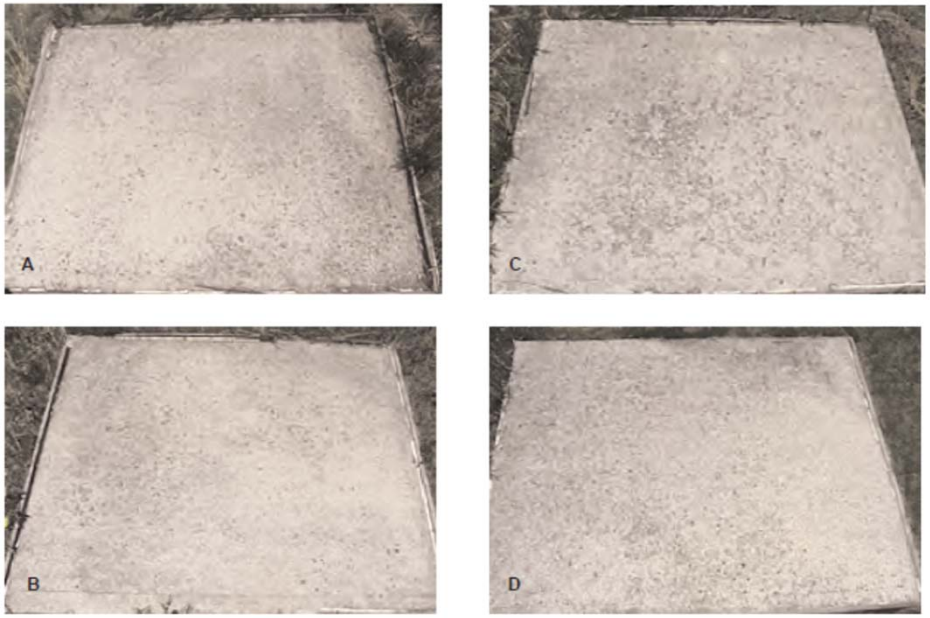
٨-١-٢ تأثير الاضافات الاسمنتية على مقاومة الصدم و مقاومة التآكل بالاحتكاك:

- 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 الاضافات 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 ايضا.
- 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.



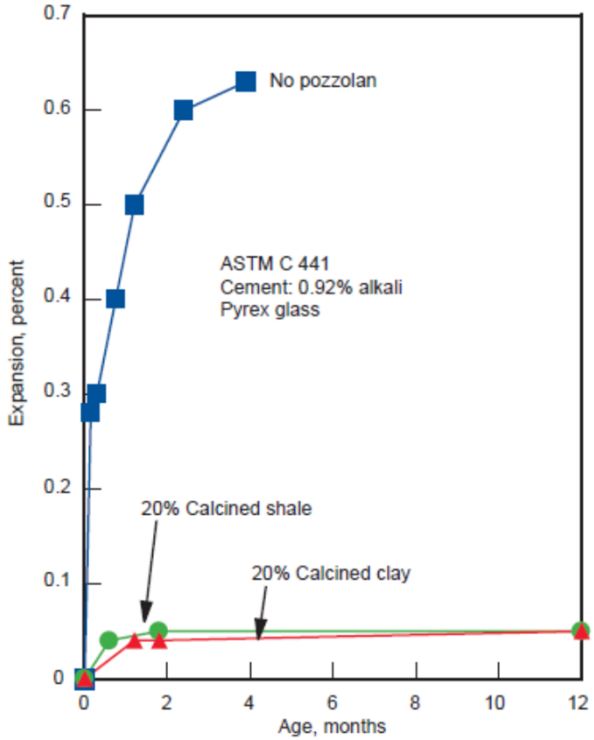
- **في الشكل جانباً اربع بلاطات خرسانية، الأولى (A) تحتوي على الرماد المتطاير، و الثانية (B) تحتوي عل الخبث و الثالثة (C) تحتوي على الطين المحروق و الرابعة (D) تحتوي على الاسمنت البورتلندي فقط. تعرضت هذه البلاطات و لمدة ثلاثون عاما للصقيع. من خلال الصور نجد ان جميع العينات ذات ديمومة جيدة ضد دورات التجمد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

٨-١-٤ تأثير الاضافات 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 هباي السيليس يمكن ان يؤدي الى انخفاض الزحف**

٨-١-٥ تأثير الاضافات 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 الاضافات الاسمنتية على التفاعل القلوي السيليسي:

- يمكن التحكم بالتفاعل القلوي السيليس عن طريق استخدام الإضافات الاسمنتية (هباب السيليس، الخبث، الغضار المشوي، الطين المشوي)، حيث تقوم هذه الإضافات بتخفيض خطر هذا التفاعل بنسبة كبيرة. يبين الشكل جانبا تأثير الغضار المشوي، و الطين المشوي على تخفيض نسبة لانتفاخ الناتجة عن التفاعل القلوي السيليسي
- ان تحديد نسبة الاستبدال المثلى للضافات 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 الاضافات 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 مثلا 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 البيئات 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 الاضافات 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، فانه يُستخدم مع الميتاكاولين 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 الاضافات 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. اذا علمنا ان القلوية العالية للخرسانة مهمة جدا في حماية فولاذ التسليح من التأكل، 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 الاضافات 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 الميتاكاولين فيمكن ان تعطي للخرسانة لونا فاتحاً

٨- نسب الاضافات الاسمنتية ضمن الخلطة الخرسانية:

- تُحدد النسبة المثلى للإضافات الاسمنتية للاستخدام مع الاسمنت البورتلندي أو الاسمنت المخلوط وفقا لنتائج الاختبارات، للتكلفة، لتوافر المادة، و وفقا للخواص المطلوبة من الخلطة الخرسانية. تهدف الاختبارات لتحد العلاقة بين المقاومة و نسبة الماء/ المادة الاسمنتية الكلية. ملاحظة: يجب ان نتذكر ان الوزن النوعي للإضافات الاسمنتية اقل من الوزن النوعي للإسمنت.
- تُحدد نسبة استخدام الاضافات 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 بورتلندي 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 البورتلندي.
- لأن بعض الإضافات تشبه الاسمنت من حيث اللون و النعومة فانه لا بد من التسجيل عليها الاسم بشكل واضح حت لا يتم استبدالها بمواد أخرى أو بالإسمنت.