الإضافات الكيميائية للبيتون

1- مقدمة:

هي كل مادة غير الماء أو الإسمنت أو المواد الحصوية تضاف إلى الخلطة البيتونية لتعديل مواصفاتها في حالتها الطرية أو مرحلة تصلب البيتون، والتي لا يمكن أن نستعيض عن الخواص المكتسبة من خلال تكنولوجيا التنفيذ العادية أو تغيير نسب الخلطة البيتونية. ويعتبر استخدام الإضافات الكيميائية من أهم الوسائل والطرق التكنولوجية والعملية والسهلة التطبيق، لتحسين جميع مواصفات الخلطة البيتونية الطرية والبيتون المتصلب، ولزيادة ديمومته. إضافةً إلى أنها يمكن أن تقلل مصروف الإسمنت وتوفر من استهلاك الطاقة وتزيد إنتاجية العمل.

وتقسم الإضافات الكيميائية للبيتون إلى نوعين: الإضافات الكيميائية السائلة والإضافات الكيميائية الصلبة. وسوف نتحدث عن كلا النوعين.

2- الإضافات الكيميائية السائلة:

هي مواد كيميائية ذات مميزات خاصة تتألف من صيغ كيميائية خاصة تضاف بجرعات صغيرة ومحددة مسبقاً قبل أو أثناء الخلط بحيث تمكننا من التحكم بشكل جيد بنوعية البيتون المنتج دون أن تؤدي لحدوث خلل في مزيج الإسمنت والمواد المكونة للخلطة البيتونية طوال مدة الإضافة. وتعمل هذه المواد على تنظيم زمن تجمد الإسمنت وتحسين قابلية التشغيل، كما تؤثر على تفاعل الماء مع الإسمنت وتزيد من المقاومة الميكانيكية أو مقاومة المواد المخربة أو الجليد.

ويمكننا أن نصنف الإضافات البيتونية إلى ست مجموعات رئيسية تبعاً لنوع تأثيرها على الخلطة البيتونية الطرية أو البيتون المتصلب وهي:

المسرعات – مؤخرات التصلب – مخفضات نسبة الماء – إضافات المحتوى الهوائي – الملدنات عالية الفعالية – مانعات الرشح (إضافات تقليل النفوذية) – ومانعات التجمد.

أما الإضافات الأخرى فتتضمن: الملدنات الفائقة – مساعدات الضخ – العوامل الممددة.

2-1- مسرعات التصلب:

تستخدم مسرعات التصلب عند صب البيتون في الطقس البارد، أو عندما يراد الحصول على مقاومة عالية في وقت قصير، أو عندما يراد فك القوالب بسرعة كما يحصل في معامل البيتون المسبق الصنع.

وتشمل عدداً من المركبات العضوية واللاعضوية، أهمها: ماءات المعادن القلوية، نترات الكالسيوم، بعض المركبات السيليكاتية، تيو كبريتات الكالسيوم، ثلاثي ايتانول أمين. ويأتي في المقدمة كلور الكالسيوم، وذلك بسبب سهولة الحصول عليه وكلفته المنخفضة، وتأثيره بجرعات مختلفة.

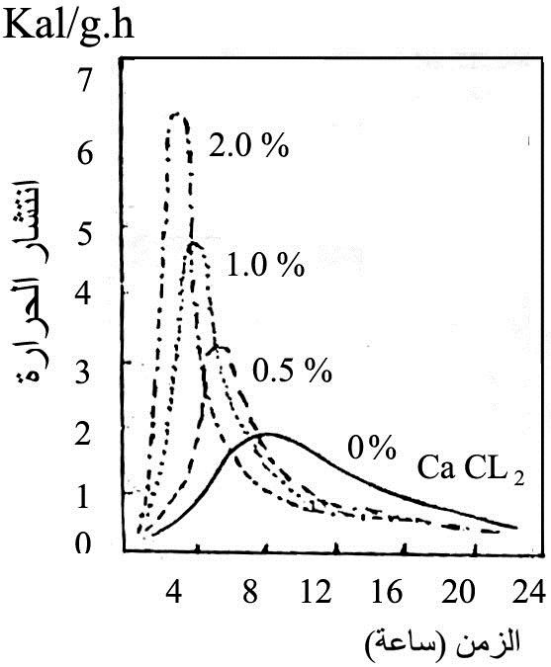
آلية تأثير المسرعات:

يعود السبب الرئيسي لفعل المسرعات إلى تأثيرها على تفاعل إماهة C_3S، حيث يعتقد بعض الباحثين أن كلور الكالسيوم يتفاعل مع بعض مركبات الإسمنت وخاصةً الألومينات والحديدات، ويشكل مركبات جديدة تساعد على تشكل نوى تترسب حولها المادة الهلامية (سيليكات الكالسيوم المائية C-S-H) وبذلك يسرع عملية الإماهة.

أيضاً لوحظ أن C_3S يتفاعل مع الماء بشكل أسرع بوجود كلور الكالسيوم. أيضاً فإن شوارد الكلور تمتز على نواتج الإماهة، فتنشط السطح وتسرع عمليات إتمام تفاعل C_3S.

ويعتقد البعض أن كلور الكالسيوم يؤثر على بنية وتركيب الطبقة الهلامية المتشكلة حول حبيبات C_3S ويجعلها أكثر نفوذية للماء.

ومن خلال دراسة المنحنيات الحرارية الممثلة لمعدل انتشار الحرارة مع الزمن والموضحة في الشكل (1) تبين تساوي كمية الحرارة المنتشرة في حالات وجود كلور الكالسيوم بنسب مختلفة وفي حالة عدم وجوده. ويستدل على ذلك من خلال المساحة المحصورة تحت المنحني الموافق. والفارق بين الحالات هو أن كمية الحرارة تنتشر في وقت أقصر بحالة وجود المسرع، وبنسبة أكبر وهذا يعني أن درجة الحرارة ضمن الكتلة البيتونية سترتفع أكثر في الساعات الأولى، وخاصةً إذا كانت أبعاد المنشأ كبيرة بحيث يصعب تبديد الحرارة المنتشرة إلى الوسط الخارجي، وهذا يؤدي في الغالب إلى حصول تشققات نتيجة الاختلاف في درجات الحرارة بين داخل الكتلة وخارجها.



الشكل (1): تأثير كلور الكالسيوم على نشر الحرارة في العجينة الإسمنتية

تأثير كلور الكالسيوم على المقاومة:

يتبين من الشكل (1) أن كلور الكالسيوم يزيد المقاومة في الأوقات المبكرة، وهذا يتعلق بمقدار الجرعة المضافة ودرجة حرارة الجو المحيط، ونوع الإسمنت. ونلاحظ في درجات الحرارة العادية، أن مقاومة البيتون بعمر 28 يوماً بوجود كلور الكالسيوم تساوي تقريباً مقاومة البيتون بدون مسرع، ولكن الفارق يظهر في أثناء حفظ العينات في درجات الحرارة السالبة، حيث أن مقاومة البيتون بوجود كلور الكالسيوم تبلغ ضعف مثيلتها بدونه. وبنتيجة دراسة تأثير تغير جرعة $(CaCL_2)$ على مقاومة البيتون، تبين أن النسبة المثالية $\%(2-1.5)$ من وزن الإسمنت، وبزيادة هذه النسبة تنخفض مقاومة البيتون، بالرغم من زيادة معدل تفاعلات الإماهة، الأمر الذي يؤكد على ضرورة حساب الكثافة، والمسامية، والتصاق الجزيئات المتعلقة بطبيعة نواتج إماهة الإسمنت.

تأثير الكلور على التسليح:

تؤثر المسرعات الحاوية في تركيبها على الكلور سلباً على حديد التسليح،إذ يؤدي استعمالها إلى تآكله مع مرور الزمن، حيث أن شوارد الكلور تحول الطبقة الواقية على سطح التسليح من أكسيد الحديد إلى كلور الحديد السهل الانحلال. لذلك تنصح بعض

المواصفات بعد استخدام المسرعات التي تحوي الكلور في البيتون المسلح، وخاصةً في البيتون المسبق الإجهاد. وتسمح بعض المواصفات باستخدام هذه المسرعات ولكن بنسبة لا تتجاوز 1%.

يمكن معالجة مشكلة تآكل الحديد بسبب وجود الكلور، بإضافة مادة مانعة للتآكل مع الخلطة الإسمنتية مثل أملاح النتريت بنسبة معينة.

تأثير الكلور على مقاومة الكبريتات:

لقد لوحظ أيضاً أن كلور الكالسيوم يخفض مقاومة البيتون للكبريتات، وذلك لأنه يؤدي إلى زيادة حجم البيتون. حيث أنه بوجود الكبريتات يساعد كلور الكالسيوم في تشكيل الجبس، ويتبعه تشكيل بلورات أكبر حجماً، هي جزيئات سلفو ألومينات الكالسيوم المائية التي يزداد طولها من 60 إلى 300 ميكرون. ويمكن التخفيف من هذه المشكلة بإضافة مولدات الفقاعات الهوائية.

2-2- مبطئات التصلب:

تستعمل خاصةً عند إجراء صب البيتون في جو حار، حيث يتم تفاعل الإماهة بسرعة في درجات الحرارة المرتفعة، فتقل فترة الخمول ويبدأ تجمد العجينة الإسمنتية وتصلبها بعد وقت قصير نسبياً بعد الموج، مما قد لا يتيح الوقت الكافي لإتمام عملية الصب بالشكل المطلوب. كذلك تساعد المبطئات في الحالات التي يحصل فيها تأخير لا يمكن تجنبه بين عمليتي المزج والصب. كما تفيد في منع حصول مناطق اتصال ضعيفة عندما تتم عملية صب كتل كبيرة على دفعات.

تركيب الإضافات المبطئة:

تتكون بشكل عام من مركبات عضوية، مثل بعض الحموض العضوية الهيدروكسيلية ومشتقاتها وأملاحها، حموض الليغنين المسلفن وأملاحها، بعض المركبات الهيدروكربونية، بالإضافة إلى عدد قليل من المركبات اللاعضوية مثل أملاح التوتياء، والرصاص والفوسفات.

آلية تأثير المبطئ:

الدور الذي يلعبه المبطئ هو إطالة فترة الخمول الناتجة في أثناء إماهة C_3S وبالتالي تحافظ العجينة على شكلها العجيني طوال فترة الخمول، وحتى بداية فترة التسارع.

ويعتقد أن سبب إطالة فترة الخمول بوجود المبطئ هو دخول المبطئ في تركيب سيلكات الكالسيوم المائية $C-S-H_1$ الذي يغلف حبيبات C_3S ويجعله أكثر ثباتاً، وبالتالي يحتاج إلى زمن أطول كي يتحول إلى $C-S-H_2$ النفوذ للماء. ويتعلق مدى إطالة فترة الخمول بنوع المبطئ المستعمل وكميته،كما يتعلق بنوعية الإسمنت وكميته، وبدرجة الحرارة.

تأثير المبطئ على المقاومة:

في الأيام الأولى بعد الصب تكون مقاومة البيتون الذي يحتوي مبطئات أقل من مقاومة البيتون بدون إضافات، ثم تزداد المقاومة تدريجياً لتساوي أو تتجاوز قليلاً مثيلتها بدون مبطئ. ولعل السبب في ذلك هو إتاحة الوقت الكافي لحبيبات الإسمنت كي تتوزع بشكل أكثر انتظاماً قبل بدء التماسك.

2-3- الملدنات ومخفضات نسبة الماء:

الغاية من استعمال هذه الإضافات كما يُفهم من تسميتها هو: إما زيادة ميوعة العجينة الإسمنتية ولدونتها، وبالتالي قابليتها للتشغيل، أو لتقليل كمية الماء مع الحفاظ على قابلية تشغيل معينة، مما يؤدي إلى زيادة المقاومة، إلى تخفيض كمية الإسمنت.

بالإضافة لذلك فإن استخدام الملدنات يزيد من تجانس الخلطة البيتونية دون أي فصل للمواد، ويساعد في الحصول على بيتون مكتنز وكتيم، يمنع أو يقلل الرشح ويقاوم الصقيع. أيضاً فإن الملدنات تخفض سرعة انتشار الحرارة الناتجة عن عمليات الإماهة، وهذا ضروري ومفيد جداً عند الصب في الأوقات الحارة أو عند صب الكتل البيتونية الكبيرة. لذلك ينصح باستخدام هذه الملدنات في مشاريع السدود وأقنية الري ومشاريع الطرق والأبنية وفي أثناء ضخ البيتون وصب العناصر الكثيفة التسليح أينما وجدت.

ويمكن التمييز بين الملدنات ومخفضات نسبة الماء من حيث التأثير على الخلطة البيتونية، فباستخدام مخفضات نسبة الماء يمكن تخفيض كمية الماء بحدود $(10-15)\%$، أما الملدنات عالية التأثير (أو عالية الخواص) فإنها تخفض كمية الماء حتى 30%، وتنتشر تحت أسماء مذيبات البيتون.

والملدنات الفائقة هي مواد تزيد من درجة سيلان البيتون وارتصاصه الذاتي وتخفض كمية الماء من أجل قابلية تشغيل معينة للحصول على مقاومة عالية عن طريق قدرة هذه المواد

على تشتيت الإسمنت. ويسمح تركيبها باستخدامها بجرعات عالية دون آثار جانبية مثل زيادة المحتوى الهوائي أو تأخير كبير في زمن التصلب.

يتم الحصول على بيتون سائل بإنتاج خلطة لها هبوط مقداره 75 mm مثلاً والتي بإضافة الملدنات إليها يزداد الهبوط إلى 200 mm دون أن يؤثر ذلك على المقاومة أو يؤدي إلى انفصال البيتون مع الانتباه أن يتم هذا التعديل بشكل ملائم.

أما بالنسبة لمخفضات الماء فيوجد:

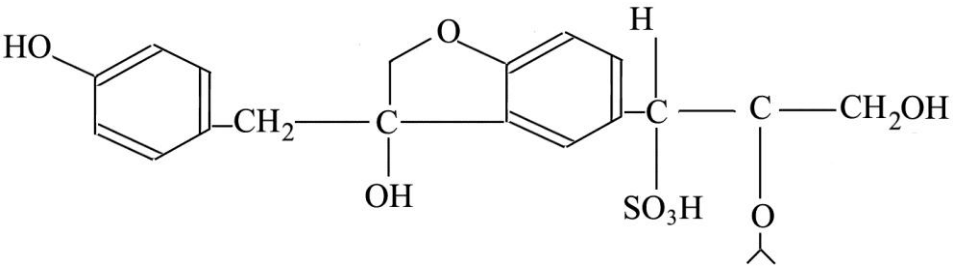
- مخفضات الماء العادية.
- مخفضات الماء المسرعة التصلب.
- مخفضات الماء المبطئة التصلب.

التركيب الكيميائي:

يدخل في تركيب هذه الإضافات بعض أملاح الليغنين المسلفن الكلسية والنتراتية والأمونية وبعض البوليميرات، مثل متضاعف نفتلين، وفورم ألدهيد المسلفن، ومتضاعف ميلامين – فورم ألدهيد المسلفن.

وعادةً يدخل في تركيب هذه الإضافات عناصر عضوية قابلة للانحلال بالماء، وأهم هذه المركبات والمعروفة منذ الثلاثينات بعض البوليميرات الناتجة من تكثيف حمض النفتالين الكبريتاتي والذي يضاف بنسبة قليلة بحدود 0.1% من وزن الإسمنت، بالإضافة إلى مواد أخرى تعمل على تسريع أو تبطيء العجينة الإسمنتية.

ويستخدم الليغنين المسلفن بشكل واسع كمادة أولية في تصنيع هذا النوع من الإضافات، وله هذه السلسلة العضوية.



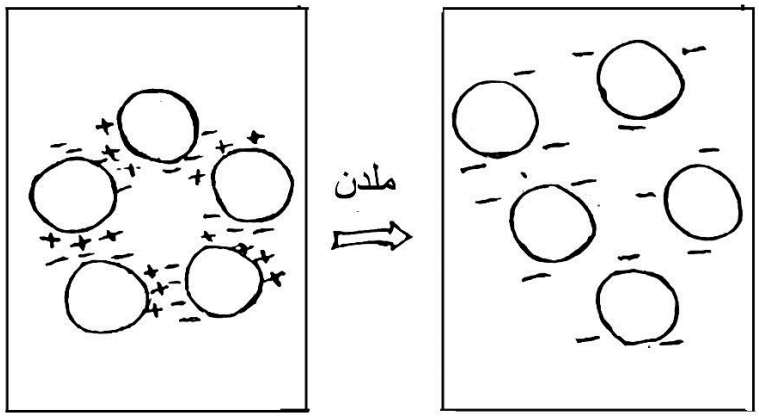
الشكل (2): الشكل الهيكلي لجزيء الليغنين المسلفن

آلية التأثير:

عند ملامسة الماء لحبيبات الإسمنت تبدأ الطبقة السطحية من هذه الحبيبات

بالتفاعل مع الماء، ويرافق ذلك تحرر بعض الشوارد التي تنتقل إلى المحلول، ويمتز قسم منها على سطح الحبيبات، فتصبح ذوات شحنة كهربائية موجبة أو سالبة. وقد تحوي الحبيبة الواحدة شحنة موجبة في طرف وشحنة سالبة في طرف آخر، وهذا يؤدي إلى نشوء قوى تجاذب كهربائي ما بين الشحن المتعاكسة، فتتجمع الحبيبات على بعضها وتحتبس كمية من الماء في الفراغات ضمن التجمع.

وعند إضافة الملدن، فإنه يعدل بعض الشحنات الموجبة بواسطة جذر السلفون السالب SO_3، وتصبح الحبيبات مشحونة بشحن متماثلة (سالبة)، تتنافر مع بعضها ويتحرر الماء المحتبس بينها، فتزداد ميوعة العجينة الإسمنتية، كما في الشكل (3).



الشكل (3): تأثير الملدنات على بعثرة حبيبات الإسمنت

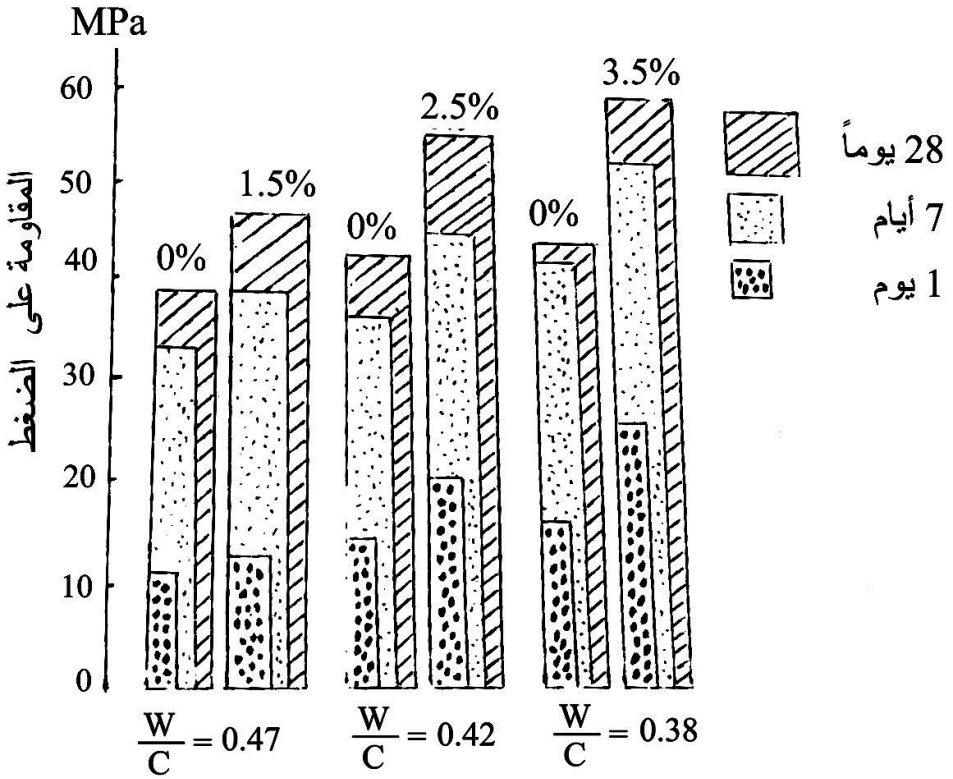
وتوجد فرضيات أخرى تشرح آلية تأثير الملدن على الخلطة البيتونية مثل:

- تخفيض الإضافات للطاقة بين عناصر الخلطة.
- تخفيض خاصية الامتزاز الجزيئي.
- تشكيل طبقات حماية ضد جزيئات الماء.
- تحرير الماء المحبوس بين جزيئات الإسمنت.

أي أن جميع النظريات والفرضيات تعتمد على تأثير الإضافات التشتيتي لذرات الإسمنت.

تأثير الملدنات على المقاومة:

يظهر تأثير الملدنات على مقاومة البيتون من خلال الشكل (4).



الشكل (4): تأثير كمية الملدن ونسبة الماء للإسمنت على مقاومة البيتون

من خلال الشكل يظهر تأثير ملدن عالي الفعالية على زيادة المقاومة الميكانيكية، وذلك دون تخفيض كمية الماء. حيث نحصل على بيتون سائل سهل الصب ولا يحتاج إلى عمليات رج. بالإضافة لذلك فإنه يمكن تخفيض كمية الماء بمقدار يصل حتى 25%، الأمر الذي يؤدي أيضاً إلى زيادة المقاومة الميكانيكية.

2-4- مولدات الفقاعات الهوائية:

أهم استعمال لها هو مقاومة فعل الصقيع في المناطق الباردة، حيث تتعرض الكتل البيتونية للتفتت والتآكل جراء تعرضها دورياً إلى درجات حرارة منخفضة حيث يتجمد الماء ضمن المسامات ويزداد حجمه.

بعد الرص فإن البيتون العادي يحتوي تقريباً على 1% هواء محبوس متوزع بشكل غير منتظم ضمن فجوات لها أشكال وقياسات غير منتظمة. إن تعمد إدخال الهواء يؤدي إلى

الحصول على كمية إضافية يمكن التحكم بمقدارها على شكل فقاعات ذات قياس منتظم موزعة بشكل منتظم ضمن الخلطة البيتونية، مما يحسن البيتون في مرحلته الطرية وفي مرحلة التصلب. تعمل الفقاعات عمل المزلقات الكروية مما يزيد من قابلية التشغيل بشكل كبير، بحيث إذا تم إضافة مادة مولدة للهواء إلى الخلطة لها هبوط مقداره 50 mm. إن مقدار الهبوط يزداد ثلاثة أضعاف كحد أدنى.

يتأثر البيتون الرطب بشكل كبير بتجمد وتمدد الماء ويزيد الهواء المحبوس في البيتون المتصلب من مقاومة البيتون للصقيع حيث تعمل الفقاعات عمل صمامات تفريغ الضغط مما يقلل من الأثر الانفجاري للصقيع.

تنتسب هذه المجموعة من الإضافات إلى مجموعة العناصر ذات الفعالية السطحية، ويكمن دورها في تقليل التوتر السطحي للماء، بحيث تؤدي إلى توليد فقاعات هوائية صغيرة جداً موزعة بانتظام ضمن العجينة الإسمنتية.

تتشكل هذه الفقاعات في أثناء عملية الخلط، وتبقى بعد تصلب البيتون الذي يصبح قليل التأثر بالبرودة الشديدة.

بالإضافة لذلك فإن وجود الفقاعات الهوائية يساعد في زيادة لدونة العجينة الإسمنتية وبالتالي قابلية التشغيل، الأمر الذي يمكن من تخفيض كمية الماء بحدود % (5-8).

من بين المواد المولدة للفقاعات الهوائية نذكر:

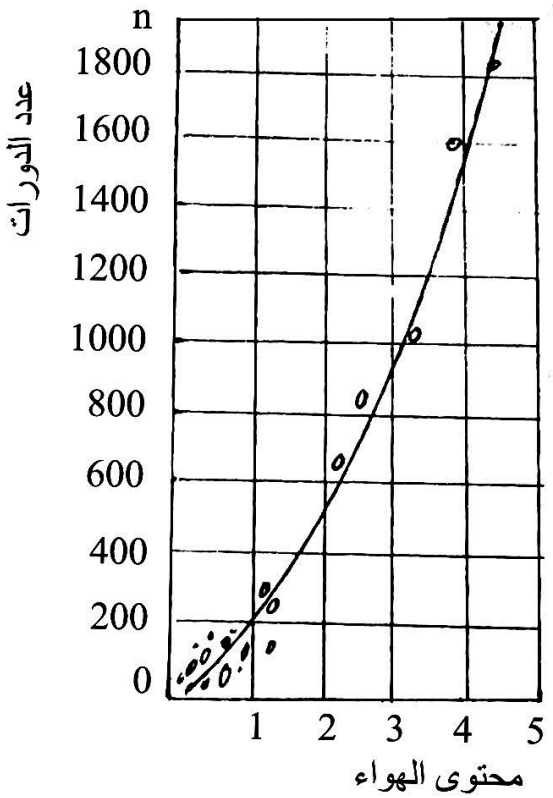
أملاح ناتجة من الراتينج النباتي، ومن مواد الغسيل الصناعية، وبعض أملاح الحموض البترولية، والليغنينية المسلفنة، وأملاح ناتجة من بعض البروتينات.

إن استخدام هذه الإضافات بمعدل 0.3% من وزن الإسمنت يؤدي إلى توليد فقاعات هوائية بحدود % (4-5) من حجم البيتون، تتراوح أقطارها بين (5-10) ميكرون. ويذكر أن كمية الفقاعات الهوائية تتعلق بكمية الإضافات المستخدمة، وتزداد طرداً مع زيادتها. ونشير هنا إلى أن الحصويات الناعمة تساعد في تشكيل الفقاعات الهوائية بعكس الحصويات الخشنة.

التأثير على المقاومة:

إن زيادة نسبة الفقاعات الهوائية في البيتون يؤدي إلى إضعاف المقاومة، ومن خلال التجارب العملية تبين أن الكمية المثالية كي تقوم الفقاعات الهوائية بدورها في

مقاومة الصقيع تبلغ بحدود % (5-4) من حجم البيتون، وأن كل زيادة مقدارها 1% من حجم الفقاعات الهوائية في كتلة البيتون، تؤدي إلى إضعاف مقاومته على الضغط بمقدار 5%. لكن من جهة أخرى يمكن تعويض بعض المقاومة المفقودة نتيجة استخدام مولدات الفقاعات الهوائية عن طريق تخفيض كمية الماء بحدود % (8-5). الأمر الذي يؤدي أيضاً إلى تقليل نفوذية البيتون، وبالتالي تزداد ممانعته للرشح.



الشكل (5): تأثير محتوى الهواء على مقاومة الجليد

2-5- مانعات الرشح:

تستخدم هذه الإضافات بشكل رئيس في بيتون المنشآت المائية والبحرية، وفي بيتون الأساسات والبيتون الجوفي الذي يقع تحت سطح الأرض، والذي يكون بتماس مع الماء، أيضاً في بيتون أحواض السباحة والخزانات وأقنية الري والمجاري والأنفاق.

واغلب الإضافات المانعة لرشح المياه هي مركبات عضوية، يمكن أن تتفاعل مع شوارد

الكالسيوم، وتشكل مركبات ضعيفة الانحلال بالماء، تترسب في المسامات والشقوق الشعرية وتعيق مرور الماء. وبعض المواد تحوي سلاسل من فحوم هيدروجينية دفوعة للماء. وعندما تتوضع هذه السلاسل في المسامات والممرات فإنها تعيق مرور الماء، مما يقلل من عملية الرشح.

أيضاً فإن كثيراً من الملدنات ومخفضات نسبة الماء يمكن أن يساهم بشكل غير مباشر في تقليل رشح المياه عبر البيتون، وذلك من خلال تخفيض كمية ماء الجبل.

2-6- الإضافات المانعة للتجمد:

تستخدم الإضافات المانعة للتجمد عند صب البيتون في الطقس البارد، وعندما تنخفض درجة الحرارة إلى ما دون $+5^{\circ}C$، وحتى $-30^{\circ}C$.

ويعتبر استخدام الإضافات المانعة للتجمد طريقة بسيطة واقتصادية وسهلة التنفيذ، مقارنةً مع غيرها من الوسائل، مثل تسخين المواد الحصوية أو الماء أو حديد التسليح. ويكمن دور مانعات التجمد في تخفيض درجة تجمد ماء الخلطة البيتونية، وفي تسريع عمليات الإماهة، وأحياناً يساهم بعضها في نشر حرارة داخل الكتلة البيتونية.

أنواع الإضافات:

تقسم الإضافات المانعة للتجمد إلى مجموعتين:

1- المجموعة الأولى: تتضمن إضافات توصف بالاضافات المسرعة قليلاً أو المبطئة لتجمد الإسمنت، وينتسب لها مجموعة من المحاليل الكهربائية المركزة مثل محلول نترات الصوديوم وكلور الصوديوم، ومحاليل ضعيفة التركيز مثل النشادر، ومحاليل غير كهرليتية ذات أساس عضوي مثل السبيرت متعدد النوى والكارباميد. ولكن لوحد أن السبيرت يبطئ التجمد كثيراً، وسعره مرتفع لذلك قل استخدامه.

2- المجموعة الثانية: تساعد في تسريع عمليات التجمد بشكل قوي، وتمتاز بمواصفات جيدة مانعة تجمد الماء، مثل البوتاس (K_2CO_3)، وإضافات يدخل في أساسها كلور الكالسيوم، كلور الصوديوم، نترات الصوديوم ... وأملاح أخرى.

3- الإضافات الإسمنتية الصلبة:

وهي مواد معدنية تشارك في تصلب الإسمنت إما من خلال المساهمة المباشرة في

تفاعلات التصلب الكيميائي، أو من خلال تأثيرها النوعي على خواص تشغيل الإسمنت. وتقسم إلى:

- مواد مائية كامنة.
- مواد مائية بوزولانية.
- مواد خاملة.

ومن أهم هذه المواد التي تستخدم كإضافات للخلطة البيتونية نذكر هباب السيليس، والرماد الطائر، وسوف نتحدث بالتفصيل عن دور وتأثير هاتين المادتين على البيتون في حالتيه الطرية والصلبة.

3-1- هباب السيليس:

3-1-1- تعريف السيليكافيوم "هباب السيليس":

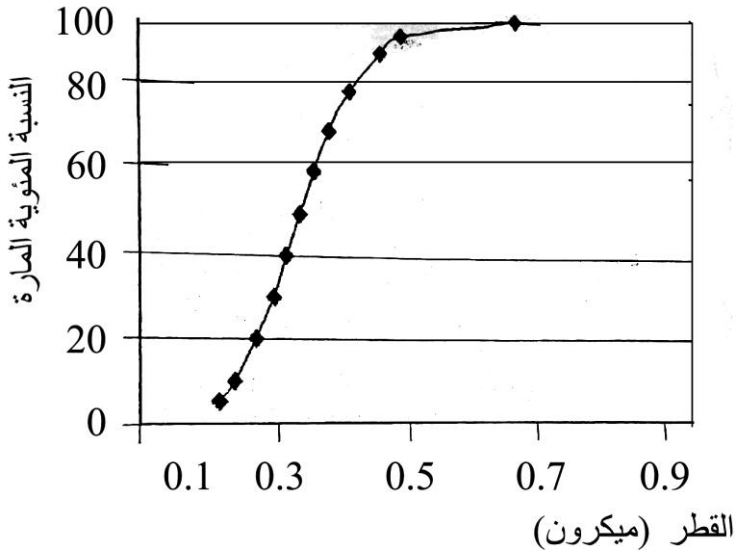
عبارة عن حبيبات سيليكا ناعمة جداً وغير متبلورة يتم إنتاجها في الأفران القوسية الكهربائية كأحد النواتج لعملية إنتاج عناصر السيليكون أو الخلائط الحاوية على السيليكون وهي تعرف باسم السيليكافيوم أو الميكروسيليكا.

وكتمهيد يمكننا القول إن السيليكافيوم عبارة عن رماد ينتج كمنتج ثانوي من الأفران أثناء إنتاج المعادن السيليكونية.

المواصفات الكيميائية والفيزيائية للسيليكافيوم:

- مادة غير بلورية.
- يشكل أكسيد السيليكون SiO_2 أكثر من 85% من تركيبها الكيميائي.
- قياس الجزيئات اصغر من 4×10^{-6} إنش أي أصغر من 1 ميكرون.
- السطح النوعي $(13000-30000)\,m^2/Kg$.

ونبين في الشكل (6) منحني التحليل الحبي لهباب السيليس الناعم.

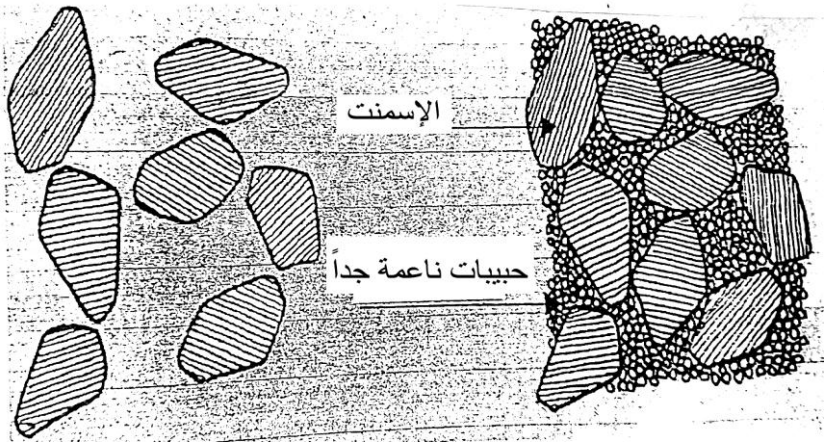


الشكل (6): منحني التحليل الحبي لهباب السيليس الناعم

3-1-2- آلية عمل السيليكافيوم في البيتون:

التأثير الفيزيائي:

إن وجود أي نوع من الجزيئات الصغيرة والناعمة جداً سيؤدي إلى تحسين خواص البيتون المستخدم، ويسمى هذا الفعل "الامتلاء الجزيئي للمواد الدقيقة: كما في الشكل (7). وقد بينت الدراسات التي أجريت على خلائط الإسمنت العادي مع الكربون ظهور مقاومات جيدة على كلا العمرين (28-7) يوم بالرغم من أن كتلة الكربون لا تزيد عن 10% من وزن الإسمنت المستخدم.

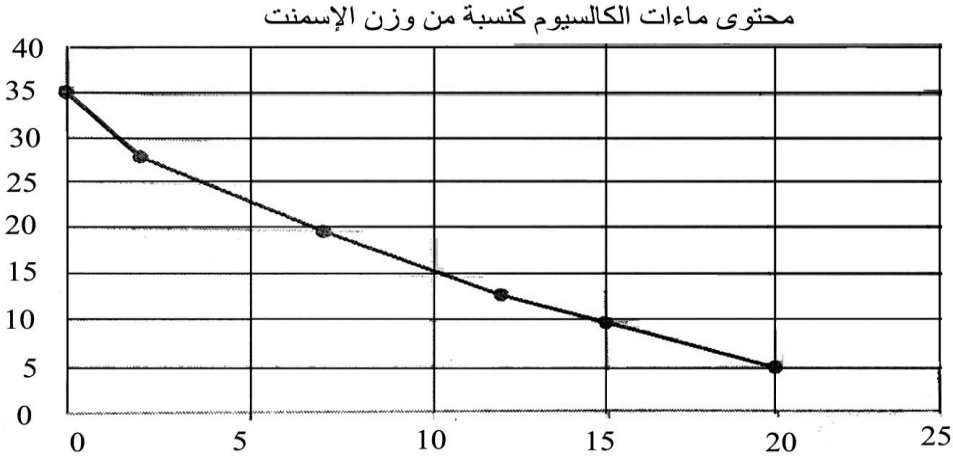


الشكل (7): توزع حبيبات هباب السيليس ضمن حبات الإسمنت

التأثير الكيميائي:

السيليكافيوم تعد مادة بوزولانية فعالة جداً، وإذا أردنا تعريف البوزولانا نستطيع أن نقول أنها: مادة سيليكونية ألومينية تتفاعل كيميائياً مع أكسيد الكالسيوم في درجات الحرارة العالية لتشكيل مركبات ذات خواص إسمنتية.

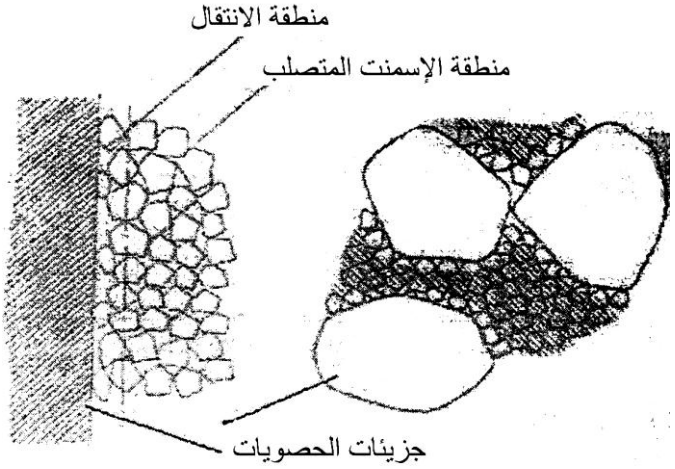
إن آلية التفاعل البوزولاني لهباب السيليس مشابهة تماماً لآلية تفاعل المواد البوزولانية التي تضاف إلى الإسمنت، ويظهر المخطط التالي نسبة الانخفاض في محتوى ماءات الكالسيوم في العجينة الطرية لمزيج الإسمنت مع هباب السيليس حيث تبلغ نسبة الماء 60%.



الشكل (8): نسبة الانخفاض في ماءات الكالسيوم ضمن العجينة الطرية لمزيج من الإسمنت وهباب السيليس

تعريف المنطقة الانتقالية:

طبقة رقيقة بين حبيبات الإسمنت المتفاعلة مع الماء والحصويات في البيتون، وتعد هذه المنطقة اضعف عناصر البيتون وهي أكثر منطقة نفوذة في البيتون.

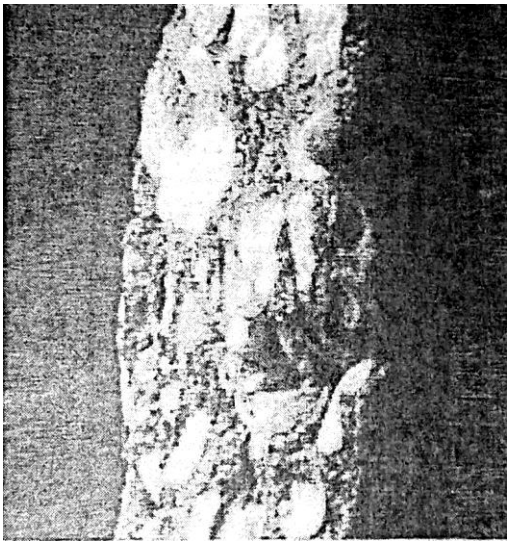


الشكل (9): منطقة التحول (الانتقال)

يبين الشكل السابق (9) منطقة التحول، حيث تعمل حبيبات السيليس الناعمة كحشوة في هذه المنطقة، كما تلعب السيليكافيوم دوراً كبيراً ضمن هذه المنطقة من خلال تأثيرها الفيزيائي والكيميائي.

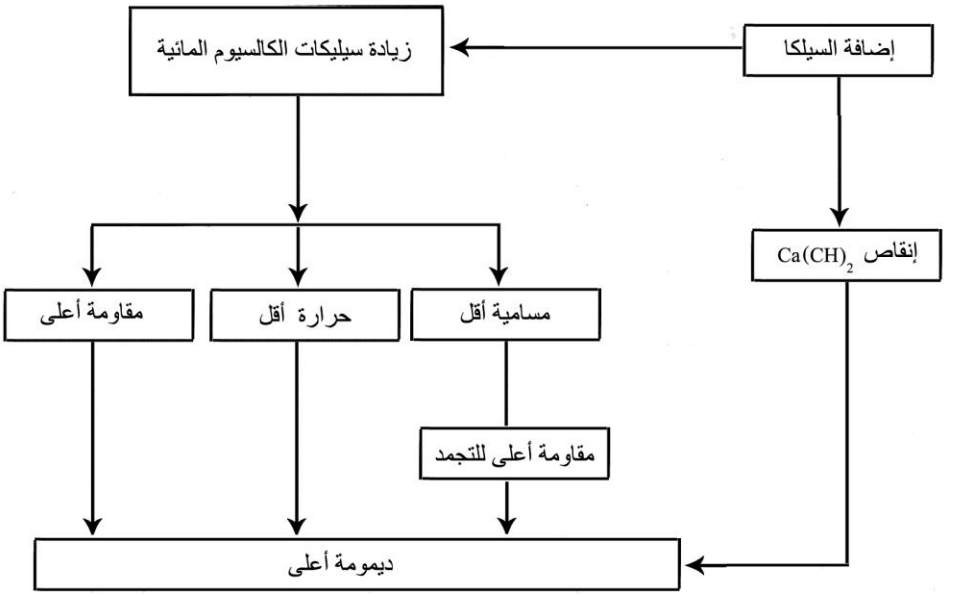
إن تأثير هباب السيليس على كثافة وتجانس التركيب البنيوي للمنطقة المشتركة يؤثر بشكل كبير على سلوك المونة الإسمنتية والبيتون، ولهذا يؤخذ بعين الاعتبار التأثيرات الجانبية لهباب السيليس على كل منهما.

ويظهر الشكل (10) التركيب البنيوي لعينات من البيتون أجريت عليها تجربة المقاومة على الضغط.



الشكل (10): التركيب البنيوي لعينات من البيتون أجريت عليها تجربة المقاومة على الضغط

والشكل (11) يبين أهم التأثيرات الايجابية لإضافة هباب السيليس إلى الخلطة البيتونية.



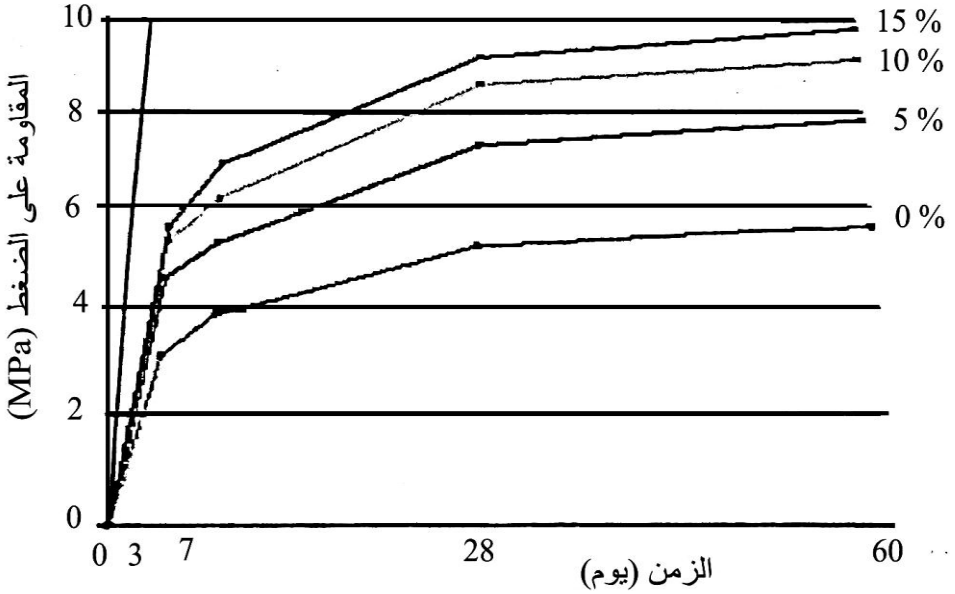
الشكل (11): أهم تأثيرات إضافة هباب السيليس إلى البيتون

3-1-3- الغاية من استخدام هباب السيليس في البيتون:

أ) تحسين الخواص الميكانيكية من خلال زيادة مقاومة البيتون وزيادة عامل المرونة:

يظهر الشكل (12) تأثير إضافة هباب السيليس بنسب مختلفة إلى البيتون من أجل نسبة $\frac{W}{C} = 0.41$ وعيار إسمنت $390\ Kg/m^3$ مع إضافة مولدات الفقاعات بنسبة 5% حيث نلاحظ ما يلي:

- زيادة المقاومة على الضغط على كافة الأعمار.
- عدم زيادة المقاومة بعد تجاوز هباب السيليس نسبة معينة من كتلة الإسمنت.



الشكل (12): تأثير إضافة هباب السيليس بنسب مختلفة إلى البيتون

ب) تحسين الديمومة: من خلال تخفيف نفاذية البيتون المقاوم للتآكل وتحسين المقاومة الكيميائية. حيث وجد من خلال التجارب أن هباب السيليس يعيق عملية تآكل البيتون في الأوساط المخربة، لكنه لا يمنعها. كما في الجدول التالي.

مقدار المقاومة والنفاذية في البيتون المضاف له هباب السيليس

نسبة السيلكا إلى الإسمنت (%)	النفاذية (RCP)	المقاومة على الضغط (MPa)
0	3000	35
7-10	1000	> 50
> 10	< 500	> 65

ج) زيادة سرعة تنفيذ المنشآت من خلال:

- تحسين عملية قذف البيتون (البيتون المقذوف) من خلال تخفيض الضياعات الارتدادية، وتحسين التماسك والالتحام.
- زيادة المقاومة المبكر، والتحكم بدرجة حرارة الخلطة.
- الإنهاء السريع للسطوح المنفذة.

3-2- إضافة الرماد المتطاير إلى البيتون:

3-2-1- تعريف الرماد المتطاير:

هي ذرات ناعمة تنتج من حرق مسحوق الفحم في درجات حرارة عالية جداً في محطات خاصة لتوليد الطاقة. وقد أصبح استخدام الرماد الطائر شائعاً جداً في جميع أنحاء العالم، وذلك لأدائه المتميز واقتصاديته عند الاستخدام، ولتأثيراته الايجابية عند إضافته للبيتون سواء في حالته الطرية أو المتصلبة.

3-2-2- التركيب الكيميائي للرماد المتطاير:

إن التركيب الكيميائي للرماد الطائر يتكون من مركبات أساسية وهي:

- SiO_2 ثاني أكسيد السيليكون.
- الفلزات المعدنية (الألومينات).
- الحديد ضروري لإتمام التفاعل البوزولاني مع الكالسيوم.

كما توجد عناصر أخرى لكن بنسب أقل وهي:

الكالسيوم – المغنزيوم والكبريت – البوتاسيوم والصوديوم.

3 -2-3- تأثيرات الرماد المتطاير على البيتون الطري:

استناداً لمواصفات ACI 232.2R فإن الرماد الطائر يتمتع بالتأثيرات التالية على البيتون الطري:

- تحسين قابلية تشغيل الخلطة البيتونية.
- تحسين قابلية البيتون للضخ.
- زيادة زمن تجمد الخلطة وذلك ضمن الحدود المقبولة.
- إنقاص قابلية البيتون للنزف.
- تحسين اكتناز الخلطة البيتونية وزيادة تماسكها.
- تقليل فعالية التأثيرات الحرارية على الخلطة البيتونية.
- زيادة مقاومة البيتون على الضغط على عمر مبكر.

ومن أهم أسباب زيادة قابلية تشغيل الخلطة البيتونية عند إضافة الرماد المتطاير هو الشكل الكروي لحبات الرماد الطائر، والتي تساعد عند إضافتها للخلطة البيتونية في إماهة كامل ذرات الإسمنت المستخدم في الخلطة البيتونية.

إن إضافة الرماد الطائر للخلطة سيخفض كمية الماء التي تحتاجها الخلطة البيتونية وذلك للحصول على الهبوط المناسب مما يؤدي إلى تخفيض الانفصال بين الحصويات المستخدمة، وزيادة التماسك فيما بينها ويعمل على ملء الفراغات بين الحصويات، وجزيئاته الكروية الشكل تعمل دور الحبات الزالقة، أثناء عملية الضخ، مما يعني أن قابلية ضخ البيتون تزداد بنسبة كبيرة عند استخدام الرماد المتطاير.

من الممكن معالجة النزف الزائد ضمن الخلطة البيتونية باستخدام نسب صحيحة من المواد الممزوجة ضمن الخلطة، وبما أن استخدام الرماد يؤدي إلى زيادة قابلية تشغيل الخلطة، وذلك باستخدام نسب منخفضة من $\frac{W}{C}$ فهذا يؤدي إلى نتيجة مهمة أن الرماد المتطاير يسمح بتشكيل خلطة بيتونية ذات تماسك جيد ولدونة جيدة بمحتوى أصغري من الماء، مما يؤدي لتقليل عملية النزف.

3-2-4- تأثير الرماد المتطاير على البيتون المتصلب:

من خلال الدراسات التي أجريت على تأثير إضافة الرماد الطائر إلى البيتون تم

التوصل إلى النتائج الآتية:

- زيادة في المقاومة على الضغط في مختلف الأعمار.
- تخفيض نفاذية البيتون بشكل ملحوظ.
- تحسين أداء البيتون في مواجهة الآثار الكيميائية.
- تخفيض معدل تآكل فولاذ التسليح المغموس ضمن البيتون.
- زيادة ديمومة البيتون المتصلب.

أنواع البيتون الخاص

1- مقدمة:

شـهد العـالم منتصـف القـرن الماضـي ثـورة تكنولوجيـة كبيـرة أثـرت علـى جميـع المجالات، ودفعتها إلى الأمام خطوات كبيرة، وكان حال المنشآت البيتونية مثل حال باقي المجالات الأخرى، فشهدت تطوراً كبيراً وسريعاً لمواكبة التطور في باقي المجالات.

هذا التطور جعل من البيتون العادي التقليدي غير ملائم لكافة المنشآت البيتونية، التي تتمثل بالمنشآت البرجية العالية، والسدود الضخمة، والجسور، والمنشآت المعرضة لتأثير المواد الكيميائية الضارة، والمنشآت صعبة الصب ... الخ. ما أدى إلى ظهور أنواع جديدة من البيتون بمواصفات خاصة تلبي الحاجات المختلفة للمنشآت البيتونية وتسهل مشاكل تنفيذها.

2- البيتون عالي المقاومة: High Strength Concrete

وهـو بيتـون ذو مقاومــة تزيـد عـن $600\,Kg/cm^2$ وقـد تصـل أو تزيـد عـن $1400\,Kg/cm^2$. ويمكن الحصول عليه باستخدام المواد المحلية المتاحة والتي تستخدم فـي صـناعة البيتـون العـادي $250\,Kg/cm^2$ مـن ركـام وإسـمنت ومـاء. إلا أن البيتـون عالي المقاومة يحتوي على مواد إضافية أخرى وهي الملدنات (Superplashticizers) التـي تمكننـا مـن تقليـل مـاء الخلـط إلـى أقصـى درجـة مـع الحصـول علـى نفـس القابليـة للتشغيل، ومواد بوزولانية بنعومة عالية أنعم من الإسمنت بعشرات المرات.

يسمح البيتون العالي المقاومة بتنفيذ الأعمال أو العناصر البيتونية بمقاطع أصغرية مع قدرتها على تحمل الحمولات الكبيرة المنقولة إليها. الأمر الذي يساعد على تخفيف الأحمال الميتة للمنشآت، بالإضافة إلى ذلك فإن البيتون العالي المقاومة بفضل ميزاته العالية يمكن أن يكون بديلاً لبعض المواد الغالية الثمن كالفولاذ والخشب.

ولتصنيع البيتون العالي المقاومة يجب دراسة خواص المواد الداخلة بتركيبه دراسة دقيقة ومن ثم دراسة سلوكية كل مادة من مواده بالنسبة إلى الأخرى ويجب أن نعرف أن البيتون

العالي المقاومة هو عبارة عن بيتون مليء "دون فراغات" متجانس دون تشققات داخلية مجهرية يحوي مواد حصوية ثابتة وقاسية وذات عامل مرونة عال وقليلة التشوه تغلف بعجينة إسمنتية ذات مقاومة ميكانيكية عالية جداً وبالتالي هو البيتون الذي لا تقل مقاومته على الضغط عن $1000\,Kg/cm^2$ بعد 28 يوماً.

ويعتمد تصنيع البيتون العالي المقاومة على إنقاص كمية ماء الجبل من خلال إضافة الملدنات بفاعلية عالية، ومواد بوزولانية ناعمة مثل هباب السيليس. تعمل جزيئات هباب السيليس بطريقة مختلفة عما تعمله جزيئات الإسمنت الناعمة جداً. إن جزيئات الإسمنت الناعمة جداً نشيطة كيميائياً فتتجمد بسرعة وتعرقل عملية وضع البيتون في القالب بالشكل المطلوب. في حين أن جزيئات هباب السيليس خاملة كيميائياً في البداية فلا تعيق عملية وضع البيتون في القالب، غير أنها بسبب نعومتها العالية تحتاج إلى كمية كبيرة من الماء لترطيب حبيباتها. هذا الأمر يعمل على عرقلة صب البيتون في القالب وهذه المشكلة يمكن حلها بإضافة مسيل بفاعلية عالية حيث يعمل هذا المسيل على تباعد الحبيبات عالية النعومة ومنع تكتلها بل تشتتها وتوزعها داخل حبيبات الإسمنت التي تعمل على زيادة اكتناز العجينة الإسمنتية بالإضافة إلى أنها تدخل بتفاعل كيميائي معقد مع مركبات الإسمنت المائية وتشكل سيليكات الكالسيوم المائية التي تتشكل على شكل هلام والتي بدورها تساهم في إملاء الفراغات وتحسين درجة اكتناز العجينة.

2-1- الخصائص المطلوب توافرها في المكونات:

أ) الركام الكبير يجب أن يكون قوي ومتين لأنه يعمل كعامل يحدد مقاومة البيتون القصوى حيث أن الشروخ في حالة البيتون عالي المقاومة تمر من خلال حبيبات الركام الكبيرة وليس حولها كما في حالة البيتون التقليدي. وقد وجد أن البيتون المصنوع من الصخر (مثل الغارنيت أو الدولوميت) تعطي مقاومة أكبر بحوالي $(10-20)\%$ من تلك المصنوعة من الزلط.

ب) الركام الصغير أو الرمل يجب أن يكون خشناً نوعاً ما حيث يكون معاير النعومة له من $(2.8-3.0)$ وذلك لأن الخلطة تكون غنية بالمواد الناعمة مثل الإسمنت وغبار السيليكا إن وجدت.

جـ) الإسمنت يجب أن يكون عالي الجودة وأن يكون متوافق مع أي إضافات مستخدمة. وقد وجد أن النسبة المثلى التي تعطي أكبر مقطع مقاومة للبيتون تقع بين $(450-500)\,Kg/m^3$ ويعتمد ذلك على خصائص وكميات ونسب باقي المكونات وعما إذا كانت الخلطة تحتوي على مادة غبار السيليكا أم لا.

د) غبار السيليكا (Silica fume): وهي مادة بوزولانية تتفاعل مع هيدروكسيد الكالسيوم النتاج من تفاعل الإسمنت مع الماء مكونة مركبات غير قابلة للذوبان مثل سيليكات الكالسيوم والتي تعمل على سد الفجوات الداخلية والمسام الشعرية، وبالتالي زيادة المقاومة وتحسين الكتامة. وعموماً فإن الزيادة في مقاومة الضغط بتأثير مادة غبار السيليكا قد لا تتجاوز 20% مع الإشارة إلى أن النسبة المثلى من غبار السيليكا تتراوح من $(10-15)\%$ من وزن الإسمنت.

هـ) الملدنات (Superplashticizers): وهي أهم مكون للحصول على بيتون عالي المقاومة حيث بواسطتها نستطيع خفض نسبة ماء الخلط إلى 0.35 من وزن الإسمنت فقط وبالتالي يمكننا الحصول على أعلى مقاومة مع الإشارة إلى أنه يجب التأكد من مدى توافق هذه المادة مع الإسمنت المستخدم.

2-2- تطبيقات البيتون عالي المقاومة:

ظل استخدام البيتون عالي المقاومة فترة طويلة محصوراً في عدة تطبيقات تقليدية (Classical Applications) هدفها الأوحد هو استغلال قيمة المقاومة العالية في الحصول على أقل مساحة قطاع وأقل حجم وكذلك أقل وزن للمنشأ. ولذلك كانت هذه التطبيقات في ثلاثة أشياء رئيسية هي: المباني عالية الارتفاع وفي الجسور وفي المنشآت البحرية.

وحديثاً تم استخدام البيتون عالي المقاومة في تطبيقات أخرى متنوعة للاستفادة بطريقة مباشرة أو غير مباشرة من مميزاتها العديدة. وهذه التطبيقات قد تأخذ اسم تطبيقات غير تقليدية مثل:

- الحصول على مقاومة مبكرة عالية.
- إعادة إحياء العناصر الإنشائية القديمة مثل الأرش.

- استخدامها مع قطاعات الحديد لزيادة صلابة المنشأ.
- عمل أوتاد لولبية لتنفيذها بدون اهتزازات أو ضوضاء.
- محطات الطاقة النووية
- الأنابيب البيتونية تحت الأرض.
- الأرصفة والطرق.

2-3- المميزات العامة للبيتون عالي المقاومة:

1- مقاومة الضغط فيها تتراوح بين $(600-1400)Kg/cm^2$ أي $(5-7)$ مرات مقاومة البيتون التقليدية.

2- معامل المرونة يساوي تقريباً مرتين إلى مرتين ونصف معامل المرونة للبيتون التقليدي مما يساعد في تقليل التشوه (Deformation) والتشكل (Deflection).

3- تمتاز بديمومة عالية (Durability) ومقاومة للاحتكاك ومقاومة للكيماويات.

4- الفوائد الناتجة منها (مثل تقليل القطاعات وزيادة البحور وتقليل الوزن) أكثر من الزيادة في تكاليف إنتاجها.

9-3- البيتون الذاتي التوضع (الرص): Self- Compacting Concrete

البيتون ذاتي التوضع هو البيتون الذي له درجة عالية من السيولة والانسياب، ثابت ومتماسك، ذا مقاومة عالية للانفصال الحبيبي، يمكن صبه بنجاح في القطاعات الضيقة والكثيفة التسليح بدون الاستعانة بأي وسيلة خارجية.

يعود السبب الرئيسي لتطوير صناعة البيتون التقليدي وصولاً إلى البيتون ذاتي التوضع إلى الحاجة المتزايدة لتحسين جودة ونوعية البيتون المستخدم على نطاق واسع في جميع دول العالم من أجل الحصول على مقاومة كبيرة للعوامل الجوية المحيطة ومقاومة عالية على الضغط والشد والأحمال التي يتعرض لها البيتون من ثم الحصول على ديمومة عالية وبخاصة بالنسبة للمنشآت ذات الطبيعة الخاصة.

ويعتبر البيتون ذاتي الرص نتاج التقدم التكنولوجي في مجال إضافات البيتون. حيث تعتبر كل من إضافات تحسين اللزوجة وإضافات تقليل ماء الخلط (الملدنات الفائقة) هما العنصرين الأساسيين اللازمين لإنتاج هذا البيتون.

3-1- أهم مواصفات البيتون ذاتي التوضع واستخداماته:

يتميز البيتون ذاتي التوضع بخصائص مختلفة تجعل من استخدامه في عالم البناء تميزاً من حيث الإنتاجية والنوعية. نذكر في هذا السياق:

1- قابليته للجريان وتحقيق الامتلاء التام للقوالب مهما بلغت درجة تعقيد أشكالها وذلك تحت تأثير وزنه الذاتي فقط دون الحاجة إلى الرج.

2- القدرة على ملء الفراغات في شبكة التسليح مهما بلغت درجة كثافتها.

3- مقاومته العالية لظاهرة انفصال الحصويات والتي تحدث نتيجة للميوعة الزائدة للمزيج الإسمنتي.

4- إنتاجية عالية ضمن مواصفات جيدة وبأقل زمن ممكن.

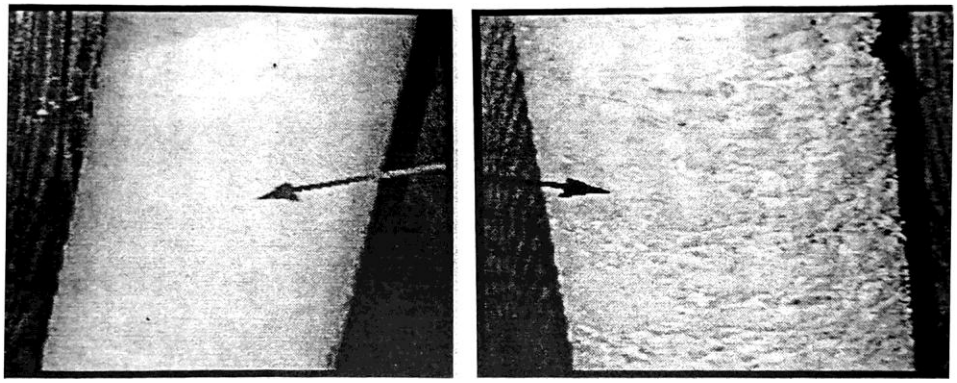
5- الصب لمسافات بعيدة دون الحاجة لتغيير مكان المضخة.

6- تجانس وملامسة السطوح النهائية.

7- توفير في اليد العاملة اللازمة لتنفيذ البيتون.

8- تحسين في شروط العمل على كافة الصعد، البيئية والصحية مع توفير الأمن والأمان للعاملين في المشروع.

ونبين في الشكل (1) مقارنة بين عنصرين ، الأول نفذ بالبيتون العادي والثاني نفذ بالبيتون ذاتي التوضع حيث يظهر الفرق من حيث استوائية الأسطح وتجانسها.



الشكل (1): اليميني نفذ بالبيتون العادي واليساري نفذ بالبيتون ذاتي التوضع

3-2- كيفية الحصول على البيتون ذاتي التوضع:

هناك صفتان أساسيتان للبيتون ذاتي التوضع في حالته الطرية وهما الجريان

والتماسك. من الملاحظ أن تحقيق جريان كبير للبيتون ذاتي التوضع يتم عموماً باستخدام الملدنات، ويتحقق التماسك (عدم انفصال المكونات) بزيادة المواد الناعمة في الخلطة وإضافة محسنات للزوجة الخلطة.

يتم رفع محتوى الخلطة من المواد الناعمة بزيادة كمية إسمنت الخلطة أو كمية الرمل المتحدة معها أو بإضافة الغبار والمواد الناعمة التي نحصل عليها من طحن بعض الصخور الكلسية أو الرماد المتطاير أو هباب السيليس.

يسمح التدرج الحبي المثالي والفروقات القليلة في حجوم الحصويات بتأثير أفضل للإضافات وتحقيق فاعلية أكبر لها لأن التدرج الحبي الجيد يؤمن الحصول على بيتون ذاتي التوضع بعيار إسمنت اقل وبكمية أقل من الإضافات المحسنة لمواصفات الخلطة.

كما يجب التدقيق في قابلية جريان البيتون الذاتي التوضع عند الصب في موقع العمل، إن الطقس الحار ومسافة نقل المجبول الكبيرة وتأخير الصب في المواقع تسبب نقصاً في الجريان وتقلل من مزايا وجودة البيتون ذاتي التوضع.

من الملاحظ أن إضافة الماء إلى البيتون ذاتي التوضع ليس عملياً لأن قابلية جريان البيتون ذاتي التوضع الكبيرة قد تسبب خروجه من الجبالة عند النقل، لذا فمن الأفضل نقل البيتون ذاتي التوضع بقابلية جريان منخفضة على أن تتم زيادتها باستخدام إضافات في موقع العمل، ويجب أخذ الحيطة والاهتمام بتماسك الخلطة أثناء الضخ والصب في الأماكن المحدودة المساحة وأن يقاوم القالب الخشبي المصمم الضغط الهيدروستاتيكي للبيتون الطري ويتحمل الضغط الشاقولي الكلي. عند صب البيتون في القالب يجب ألا نلحظ أي انفصال لمكونات الخلطة أو هروب للماء أو تعشيش للمواد الحصوية.

بالمقارنة بين خلطات البيتون ذاتي التوضع وخلطات البيتون التقليدي نجد أن حجم العجينة في خلطة البيتون الذاتي التوضع أكبر.

وتجدر الإشارة أنه بالنسبة للبيتون ذاتي التوضع فإن تحقيق متطلبات وخواص البيتون الطازج يكون له الأولوية إذا قورن بمتطلبات وخواص البيتون المتصلب، حيث تعتبر المرحلة الطازجة هنا هي الغاية المنشودة، ولذلك توجد اختبارات خاصة لقياس خواص المرحلة الطازجة من البيتون. نورد بعضاً منها.

3-3- اختبارات البيتون ذاتي التوضع:

من أهم الاختبارات الواجب إجراؤها على البيتون الطري للتحقق من وصولنا إلى ما نسميه البيتون ذاتي التوضع نذكر:

3-3-1- اختبار الانبساط "قابلية التشغيل":

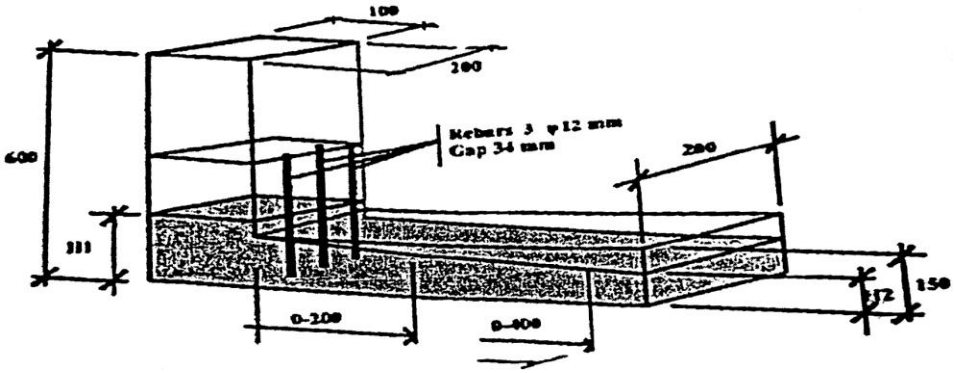
تجرى هذه التجربة على البيتون الطري بتقييمه على أنه بيتون ذاتي التوضع حيث يستخدم في إجراء هذه التجربة مخروط أبرامز المعروف والذي يستخدم في قياس قابلية التشغيل في البيتون الكلاسيكي مع الإشارة إلى أن الاختلاف هنا يكمن في قياس قطر انتشار العينة التي كانت بداخله بدلاً من قياس الهبوط الشاقولي بها كما هو معتمد في البيتون التقليدي، حيث يتم ملء المخروط بالكامل دون رص ويرفع ليقاس انتشار البيتون. توضح الأشكال الآتية كيفية القيام بهذه التجربة وكيفية أخذ القياسات، حيث تنص المواصفات العالمية على أخذ قياس قطر الانبساط للعينة باتجاهين ويجب أن يكون الناتج الوسطي لهما محصوراً في المجال $(600-700)\,mm$.

$$600\,mm < \frac{D_1 + D_2}{2} < 700\,mm$$

3-3-2- اختبار الجريان ضمن العلبة (L Box):

بعد تثبيت وزن الملدن والإضافات الصلبة وكمية الماء نعمل على إجراء اختبار الجريان في العلبة المسماة L Box. يهدف هذا الاختبار إلى التحقق من جريان البيتون ضمن شبكة التسليح بشكل جيد يسمح لنا بإطلاق تسمية ذاتي التوضع عليه بحيث أن يتم هذا الجريان تحت تأثير وزنه الذاتي وبدون استخدام الرج بالآليات المعروفة أو حتى الرج اليدوي.

يبين الشكل (2) أبعاد وشكل العلبة المستخدمة مع التفاصيل الأخرى.



الشكل (2): العلبة (L-Box)

نقيس في هذه التجربة النسبة $\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$ حيث:

h_1: ارتفاع البيتون بعد الجريان في بداية العلبة.

h_2: ارتفاع البيتون بعد الجريان في نهاية العلبة.

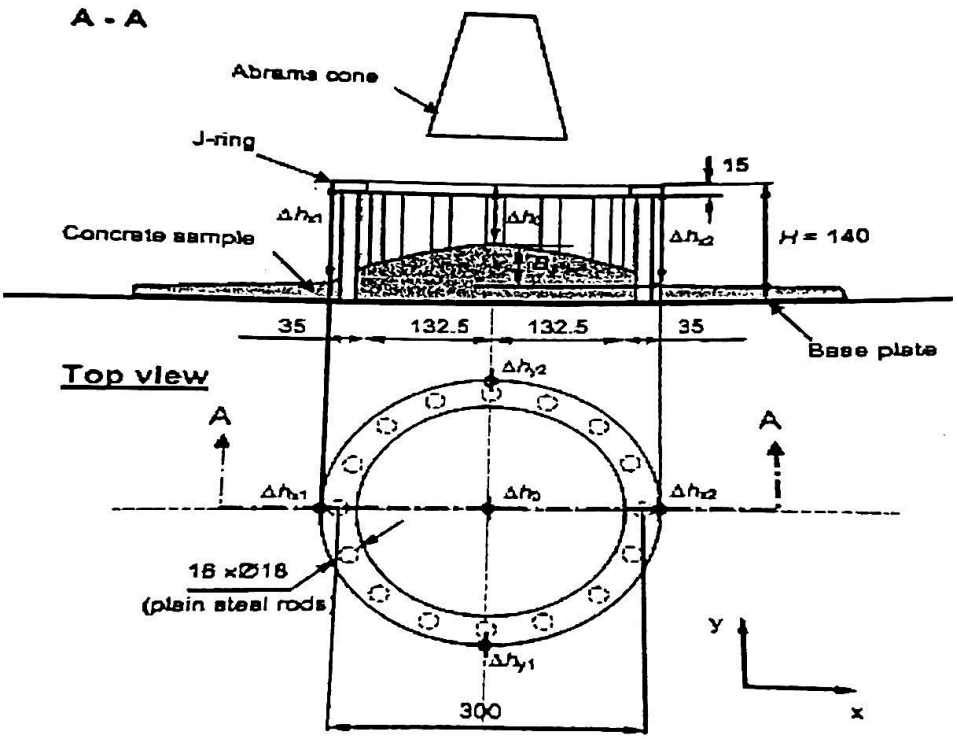
كلما اقتربت هذه النسبة من الواحد دل ذلك على تحقق النجاح المرجو من التجربة، ولكن المواصفات العالمية تقبل بالنسبة 0.8 لمقاربة التوصل إلى صناعة البيتون ذاتي التوضع.

3-3-3- طريقة الحلقة J:

زمن السيلان وفق اختبار الحلقة J $\left(T50_j\right)$ يمثل الفترة الزمنية بين اللحظة التي ينفصل فيها القمع المخروطي عن الصفيحة القاعدية واللحظة التي يلامس فيها البيتون لأول مرة الدائرة ذات القطر 500 mm. يعبر عن $\left(T50_j\right)$ بالثواني إلى أقرب عُشر من الثانية، كما في الشكل (3).

اعتماداً على الاختبارات الخاصة بالمشروع الأوربي "اختبار البيتون ذاتي التوضع" يكون:

$$3.5\text{sec} < T50_j < 6\text{sec}$$



الشكل (3): اختبار الجريان بالمخروط والحلقة

4- البيتون البوليمري: (Polymer Concrete)

البـوليمر أو الـراتنج هـو اسـم لمـادة عضـوية تتكـون مـن العديـد مـن الجزيئـات المتشابهة ذات الوزن الجزيئي المرتفع، والجزء الواحد من هذه الجزيئات يسمى مونومر.

أما البيتون الراتنجي فهو بيتون يتم الحصول عليه بمعاملة البيتون العادي بمواد البوليمر التي تعمل كمواد لاحمة أو مالئة للفراغات بين حبيبات الركام. وتمثل المواد البوليمرية حوالي $(6-15)\%$ من وزن البيتون ومن أمثلتها مواد أو مركبات البوليستر (Polyester) والإيبوكسي (Epoxy) وقد تصل تكاليف بيتون البوليمر حوالي (2-3) مرات تكاليف البيتون العادي وتمتاز بالاتي:

- مقاومة عالية للعوامل الخارجية مثل مقاومة التآكل ونفاذ الماء والمقاومة للكبريتات.
- مقاومة عالية جداً للانكماش.
- مقاومة ضغط عالية قد تصل إلى $1200\,Kg/cm^2$.
- مقاومة شد تصل إلى $100\,Kg/cm^2$.

وعموماً يوجد ثلاثة أنواع رئيسية من البيتون المحتوية على راتنجات:

1- البيتون البوليميري (Plastic Concrete (PC.

2- البيتون البوليميري الإسمنتي (Polymer Cement Concrete (PCC.

3- البيتون الإسمنتي المحقون بالبوليميرات (Polymer Impregnated Concrete (PIC.

9-4-1- البيتون البوليميري: (PC)

وفيه تحل الراتنجات محل الإسمنت كمادة رابطة لجزيئات الركام. أي أنه عبارة عن ركام متماسك مع بعضه بواسطة مادة رابطة من البوليميرات. والبيتون البلاستيكي لها خواص ميكانيكية عالية وزمن معالجتها قصير ولها انكماش متناهي في الصغر ومقاومة عالية للكيماويات، وتتوقف الخواص على نوع الراتنج المستخدم وكميته في الخلطة. ومن أهم الأنواع المستخدمة:

- الإيبوكسي، - البولي إستر، - الفينول فورمالدهيد، - فورفورال أسيتون.

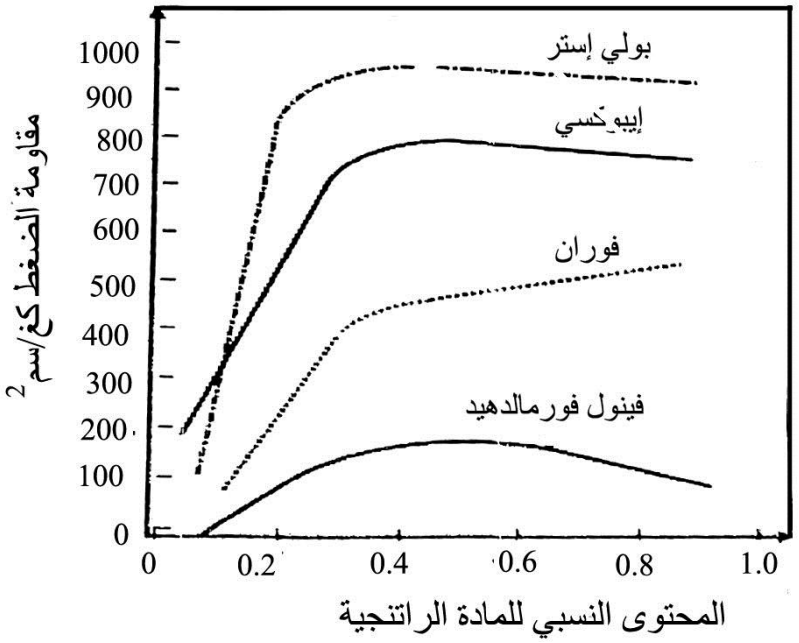
أهم تطبيقات البيتون البوليميري:

1- تنفيذ طبقة حماية سطحية لأسطح الجسور والمصانع وأماكن الخدمات والسلالم والبيتون المسلح ومسبقة الإجهاد.

2- ترميم البيتون الذي حدث به شروخ نتيجة الحرارة أو الانكماش أو الاهتزازات.

3- لصق البيتون الحديث والقديم أو الوحدات مسبقة الصب.

4- لصق البيتون على المعادن كطريقة للتقوية والتسليح الخارجي.



الشكل (4): مقاومة الضغط لبعض الأنواع من البيتون البلاستيكي

4-2- البيتون البوليميري الإسمنتي PCC:

وهو البيتون الذي يصنع بخلط الإسمنت والركام ويضاف إليه ماء الخلط المضاف إليه الراتنج. أي أنه بيتون تقليدي مع إحلال جزء من ماء الخلط بواسطة مواد راتنجية. والراتنج المضاف يكون في عبوتين: إحداهما تحتوي على المونومر والأخرى تحتوي على المصلد اللازم للتفاعل الكيميائي وإتمام عملية البلمرة (اتحاد الجزيئات). وتتم عملية البلمرة أثناء عملية التصلد للبيتون، ومن ثم تتكون شبكة مستمرة من البوليميرات تملأ أغلب فراغات البيتون. ويجب الحذر بأن لا تعطل عملية البلمرة طور الإماهة للإسمنت، ومن أهم المونومرات الشائعة الاستخدام كإضافة للبيتون:

- فينيل أسيتات، - الإكريلات، - فينيل كلوريد
- مستحلبات البيتومين، - المطاط، - الإيبوكسيات.

وتجدر الإشارة إلى أن العلماء الروس قد توصلوا إلى بيتون إسمنتي بوليميري ذو خواص عالية وذلك بإدماج فورفريل الكحول (Furfryl Alcohol) وهيدروكلوريد الإيثيلين في خليط البيتون مما نتج عنه بيتون كثيف ومعدوم الانكماش تقريباً وذا مقاومة عالية للصدأ

وذو مسامية منخفضة ومقاومة للاهتزازات.

4-3- البيتون الإسمنتي المحقون (المشرب) بالبوليميرات:

وهو البيتون الإسمنتي المتصلد والذي سبق صبه ويتم حقنه أو غلغلته بواسطة مونومرات ذات لزوجة منخفضة، ثم تتم البلمرة لهذه المونومرات وهي داخل البيتون. وتنقسم إلى نوعين: البيتون المشرب كلياً، والبيتون المشرب جزئياً.

يقصد بالتشريب الكلي أن حوالي 85% من الفراغات الموجودة يتم إملاؤها بالمونومير. وتتم عن طريق إزالة الرطوبة بشكل كامل من البيتون لكي نؤمن المقدار الأعظمي من الفراغ المسامي للملء بالمونوميتر. يتبع ذلك إشباع كامل بالمونومير تحت الضغط عادةً وبعده بلمرة نظام المونومير. أما البيتون المشرب جزئياً (ويدعى أحياناً بالبيتون ذو السطح المشرب) فينجز عادةً بتشريب البيتون الإسمنتي إلى عمق معين من السطح وبشكل مغاير للبيتون المشرب كلياً الذي يشرب إلى كامل عمق المقطع.

وإذا كانت الغاية من التشريب الكلي هي زيادة المقاومة الميكانيكية للبيتون وتحسين مقاومته لنفوذ الماء، فإن الغاية من التشريب الجزئي هي تأمين بيتون بمنطقة غير نفوذة للماء ومحمية في العمق من الرطوبة والمحاليل الضارة.

وأهم المونومرات التي تستخدم في هذه الطريقة هي:

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

وقد أوضحت التجارب أن البيتون المغلغل بالمثيل ميثاكريلات والذي يتم بلمرته بالإشعاع لها مقاومة ضغط تصل إلى حوالي 300% عند درجة تشبع بالبوليميرات مقدارها 6.6%.

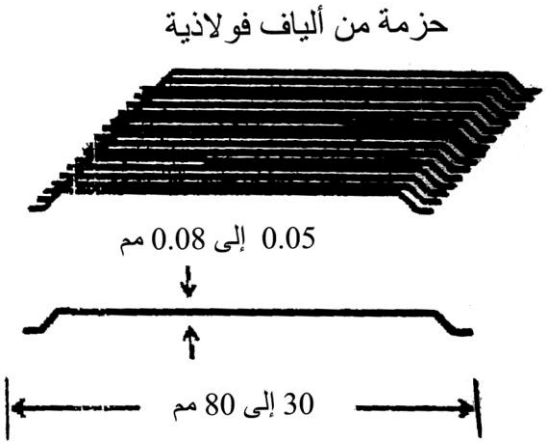
5- البيتون المسلح بالالياف: (Fiber Concrete)

وهو البيتون المصنوع من الإسمنت والركام والمحتوي على ألياف غير مستمرة وموزعة توزيعاً عشوائياً في جميع الاتجاهات ضمن الكتلة البيتونية. وتنقسم الألياف إلى قسمين رئيسيين من حيث النوع:

- ألياف فولاذية وهي قطع فولاذية بطول يتراوح بين $(3-8)\text{cm}$ وقطر يتراوح بين

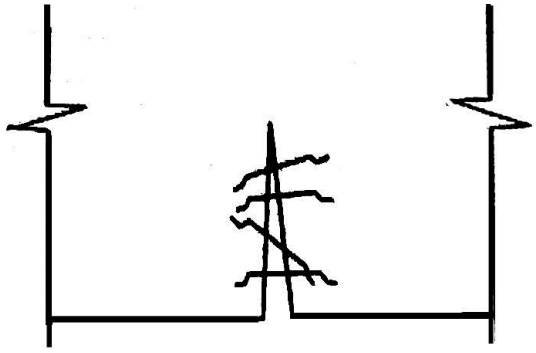
$(0.5-0.8)\,mm$ كما بالشكل (5).

- الألياف الصناعية مثل ألياف البولي بروبلين والبوليستر والبوليثيلين والأكريليك وتأخذ نفس شكل الألياف الفولاذية ولكنها مصنعة من مواد صناعية.

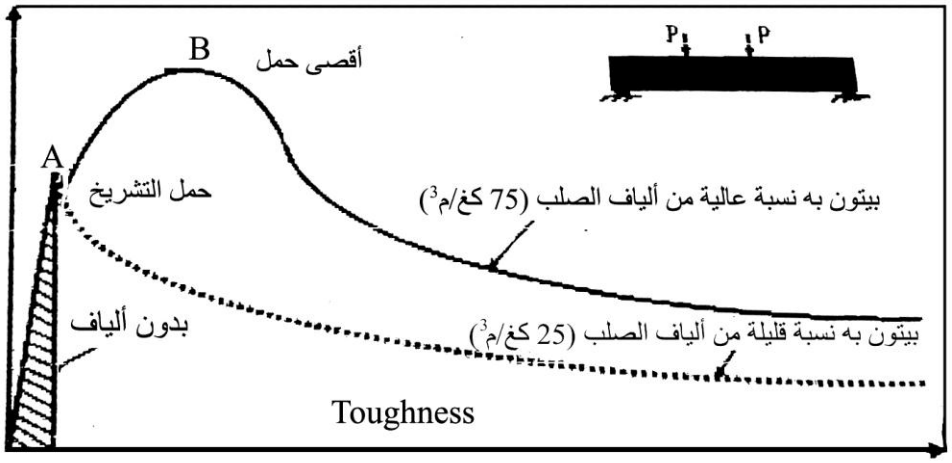


الشكل (5): ألياف فولاذية غير مستقيمة الأطراف

والألياف لها القدرة على تحسين مقاومة البيتون على القص والشد والانحناء والصدم والانكماش. كما أنها تعمل على تقليل اتساع الشروخ وإعادة توزيعها كما يتضح ذلك من الرسم في الشكل (9-؟؟). ولكن الألياف لا تؤثر بدرجة كبيرة على مقاومة الضغط. وأهم وظيفة للألياف أنها تزيد من قيمة معامل المتانة زيادة كبيرة جداً. والشكل (6) يوضح منحني التحميل والتشوه للبيتون الليفي ومدى زيادة المتانة في البيتون الليفي. وبالتالي فهي تحول ميكانيكية الكسر في البيتون من كسر قصف مفاجئ وخطر إلى كسر غير قصف وتدريجي.



الشكل (6): دور الألياف في تقليل اتساع الشروخ وإعادة توزيعها



الشكل (7): منحني التحميل والتشوه للبيتون الليفي

يستخدم البيتون الليفي على نطاق واسع في الطرق والمطارات والمنشآت العسكرية وقواعد الماكينات. كما يستخدم في الأسقف القشرية ومناطق الاتصال بين الجائز والعمود في الإطارات. ويستخدم أيضاً في الأنابيب البيتونية والوحدات مسبقة الصب وفي العناصر البيتونية المعرضة لقوى القص والصدم، وبالرغم من أن الألياف تزيد من مقاومة قوى الشد في الانحناء إلا أن هذه الزيادة غير جديرة بالاعتبار لكي تستخدم الألياف كبديل كلي أو تعويضي لقضبان التسليح.

6- البيتون المنفذ بالمداحل:

لأن البيتون المنفذ بالمداحل (RCC) يأخذ اسمه من طريقة إنشائه، حيث يصب في المكان المطلوب ثم يتم رصه بالدحل، وذلك بنفس الآليات المستخدمة لإنشاء ورص طبقات الإسفلت، ثم يعالج طبقاً للمواصفات.

إن خلطة البيتون المنفذ بالمداحل (RCC) تتألف من نفس المكونات الأساسية للبيتون الكلاسيكي: حصويات، إسمنت بورتلاندي، مواد إضافية معدنية (رماد متطاير، خبث المعادن، مركبات السيليكا)، والماء. لكن نسبة الماء إلى الإسمنت $\left(\frac{W}{C}\right)$ فيه منخفضة مقارنةً مع البيتون الكلاسيكي، أي أنه خليط جاف كفاية لإمكانية رصه بواسطة المداحل

الهزازة.

1- جاف كفاية ليلاءم عمل المدحلة الهزازة هذا من جهة، أما من جهة أخرى فإنه رطب كفاية ليسمح بتوزيع وتغلغل الملاط بشكل جيد بين المواد الحصوية.

2- محتوى ملاط أقل.

3- محتوى مواد حصوية ناعمة أكثر.

4- المواد الحصوية الخشنة ذات قطر اسمي أعظمي $\left(\frac{5}{8}\right)$.

ميزات البيتون المنفذ بالمداحل: Features of RCC

إن طريقة صنع وتنفيذ طبقات البيتون المنفذ بالمداحل جعلته يملك عدة ميزات:

- مقاومة ضغط عالية $(28-70)\text{MPa}$ يقاوم الحمولات المركزة العالية.
- مقاومة قص عالية، تؤدي إلى إلغاء التشققات والأخاديد.
- محتوى ماء أقل $\left(\frac{W}{C}\right)$ منخفضة، وهذا يؤدي إلى زيادة المقاومة وتقليل النفاذية ويحسن الديمومة ومقاومة المواد الكيميائية المخربة.
- تعشيق جيد للحصويات بسبب الرص وهذا يزيد مقاومة القص.
- الكلفة المنخفضة في الإنشاء والاستثمار، وذلك بسبب البساطة في الإنشاء وعدم الحاجة إلى التسليح. واستخدام آلات الصب الكلاسيكية.

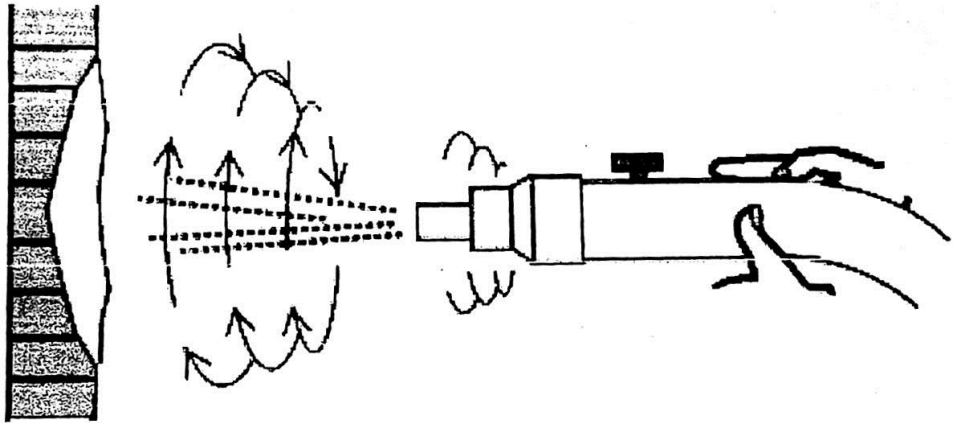
7- البيتون المقذوف (بيتون الرش): Shotcrete

هو بيتون (أو مونة) يقذف بضغط الهواء من فوهة القاذف بسرعة عالية إلى السطح المراد تغطيته بالبيتون، ويستخدم غالباً في أعمال الإصلاحات والترميم (Repair) وتبطين الاتفاق (Tunnels) وتبطين الترع. وفي كثير من الأحوال التي يصعب فيها استخدام الطرق التقليدية في الصب. فمثلاً عندما يكون المطلوب صب طبقات غير سميكة أو متغيرة السماكة أو عندما يصعب الوصول إلى منطقة العمل أو عندما يكون استخدام الشدات صعباً أو مكلفاً. كما يستخدم البيتون المقذوف في إصلاح البيتون المتداعي في الجسور والسدود والمنشآت المواجهة للمياه وكذلك مباني الطوب المتآكلة.

كما يستخدم في تبطين الأفران بكافة أنواعها.

ويوجد نوعان رئيسيان لطريقة تنفيذ الخلطة، أسلوب الخلط الجاف وأسلوب الخلط المبتل. ففي الطريقة الجافة يتم خلط الركام والإسمنت وأي مكونات أخرى وهي جافة أولاً وتدفع باستخدام ضغط الهواء خلال القاذف، ثم يضاف الماء عند فوهة القاذف ويدفع الجميع إلى السطح المراد صبه. أما في الطريقة الرطبة فيتم خلط جميع المكونات بما فيها الماء خلطاً جيداً أولاً (ما عدا مسرعات الشك إن وجدت) ويدفع الجميع باستخدام ضغط الهواء خلال القاذف إلى السطح المراد صبه. وفي جميع الأحوال يلزم إعداد السطح المقذوف عليه البيتون لضمان جودة ترابطه معه. ويمكن القول أن خواص وسلوك البيتون المقذوف يعتمد كثيراً على صفات المعدات المستخدمة وعلى مهارة القائمين بها كما يعتمد على الظروف التي يتم بها الصب.

وتتميز خلطة البيتون المقذوف باحتوائها على محتوى إسمنت أعلى لتعويض نسبة الفقد منه عند الارتداد من السطح، وكذلك فإن ركامها يتميز بصغر المقاس حيث يفضل أن لا يزيد عن 12 mm. كما أنها قد تحتوي على إضافات معينة لتحسين بعض الخواص المرغوبة، وغالباً ما تحتوي مسرعات (Accelerators) وذلك لتسريع زمن الشك للبيتون. ويفضل أن تكون فوهة القاذف عمودية على السطح المصبوب ولا تتعدى زاوية ميل القاذف على السطح 45° وذلك لضمان التوزيع المنتظم للبيتون، ولتجنب حدوث تكور ودحرجة للبيتون على السطح مما يؤدي إلى سطح متعرج غير منتظم. كما يفضل أن تكون المسافة بين فوهة القاذف والسطح في حدود $(0.6-1.8)\text{m}$، والشكل (9-؟؟) يوضح استخدام البيتون المقذوف والتحكم في القاذف.



الشكل (8): حركة دورانية خفيفة في فوهة الدفع لإنتاج بيتون مقذوف جيد

8- البيتون الخفيف: (Lightweight Concrete)

من أهم عيوب البيتون التقليدي $\left(2200-2500\,Kg/m^3\right)$ كمادة إنشائية بالمقارنة مع الخشب والحديد أنها ثقيلة الوزن نسبياً، حيث أن نسبة الوزن الذاتي لأجزاء المبنى (Own Weight) بالمقارنة مع الأحمال الأخرى هي نسبة عالية في جميع الأحوال. لذلك تم التفكير في إنتاج واستخدام بيتون خفيف وزنه الحجمي أقل من $2000\,Kg/m^3$. لذلك فقد أمكن تصنيع بيتون إنشائي يزن $(400-1900)Kg/m^3$ بزيادة بسيطة في التكاليف وكذلك إنتاج بيتون نصف إنشائي للبلوكات الداخلية يزن $900\,Kg/m^3$، ويستعمل بكفاءة كجدران داخلية.

وعموماً فإن البيتون الخفيف هو ذلك الذي يقل وزنه الحجمي عن $2000\,Kg/m^3$. والغرض من استخدامه هو تقليل وزن المنشأ وبالتالي تقليل تكاليف الأساسات وكذلك لأغراض العزل الحراري والصوتي.

أنواع البيتون الخفيف:

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

1- إيجاد فراغات بين حبيبات الركام (بيتون خالي من المواد الناعمة Finless Concrete).

2- إيجاد فراغات داخل الركام (بيتون ذا ركام خفيف Lightweight Aggregate Concrete).

3- إيجاد فراغات داخل العجينة الإسمنتية (البيتون المهوى أو الخلوي Cellular Concrete).

8-1- بيتون خالي من المواد الناعمة: (Finless Concrete)

يتكون من الإسمنت والركام الكبير فقط وأحياناً يستخدم فيه الهواء عن طريق إضافة مواد رغوية أو باستعمال تدرجات خاصة من الركام. والركام الكبير يمكن أن يكون زلط أو أحجار مكسرة أو ركام خفيف. وينحصر تدرج الركام بين $(10-20)mm$، ولا

تتعدى نسبة المار من المنخل الصغير عن 5%. وهذا النوع من البيتون ذو كثافة تتراوح بين $\left(\frac{2}{3} \rightarrow \frac{3}{4}\right)$ كثافة البيتون التقليدي المصنوع من نفس الركام. وهذا النوع يحتاج إلى تصميم دقيق وخصوصاً بالنسبة لمحتوى الماء.

8-2- بيتون الركام الخفيف: (Lightweight Aggregate Concrete)

بيتون الركام خفيف الوزن هو أكثر أنواع البيتونات الخفيفة شيوعاً واستخداماً، إذ يمكن استعماله كبيتون إنشائي. والركام المستخدم في هذا البيتون هو في أغلب الأحوال ركام صناعي. يُعتبر إنتاجه أحد أجزاء التصنيع للبيتون الخفيف.

ومن أنواع الركام الصناعي الخفيف نذكر:

البيرلايت – الطين العمد (الليكا) – الفيرموكليت – الفوم (بوليسترين)

8-3- البيتون المهوى (ذي الخلايا): (Cellular Concrete)

في هذا النوع تتكون فقاعات من الغازات والهواء في وسط البيتون وهي في الحالة الطازجة ويبقى التركيب المسامي بعد تصلب البيتون. والطريقتان الرئيسيتان لإنتاج هذا النوع هما:

أ) إنتاج غازات في الخلطة بتفاعلات كيميائية.

ب) إضافة مواد رغوية للخلطة.

ومن المواد الشائعة المولدة للغازات المسحوق الناعم من بودرة الألمنيوم أو بودرة الزنك (0.2% من وزن الإسمنت) وعند خلطها بالإسمنت تتكون فقاعات من الهيدروجين فتنتفخ الكتلة مكونةً عند تصلدها مادة ذات تركيب خلوي. وتجدر الإشارة إلى أن هناك علاقة طردية بين وزن البيتون ومقاومته للضغط.

9- البيتون الثقيل: (Heavy Weight Concrete)

يصنع هذا البيتون للوقاية من الإشعاع الذري والنووي، حيث تتناسب قدرة البيتون لامتصاص هذه الإشعاعات مع وزنها أو كثافتها وبالتالي تكون جدران وبلاطات الأرضيات والأسقف من البيتون الثقيل. ويصنع البيتون الثقيل من ركام من مواد ثقيل من

خامات الحديد أو الرصاص. وتجدر الإشارة أن خام الحديد يعطي بيتون وزنه يتراوح بين $(3000-4000)\,Kg/m^3$، وقد تستخدم قطع من الحديد كركام وتصل كثافة بيتونه إلى $5600\,Kg/m^3$. ومن الممكن أيضاً استخدام النواتج الثانوية للفرن العالي لإنتاج بيتون ذو كثافة حوالي $2800\,Kg/m^3$. ويستخدم في بعض الأحيان ركام من صخر السربنتين (سليكات المغنزيوم المميهة). وبصفة عامة فلا بد لركام البيتون ثقيل الوزن أن يحقق متطلبات الكثافة والتركيب وذلك للوقاية من الإشعاع، ويستخدم الإسمنت البورتلاندي العادي ولكن يفضل الإسمنت منخفض الحرارة في حالة البيتون الكتلي ثقيل الوزن. كما لا يستخدم الإسمنت سريع التصلد ولا الإضافات المسرعة أو إضافات الهواء المحبوس، ويمكن استخدام الملدنات والمبطئات.

ونظراً لأن الركام المكون من قطع الحديد يميل دائماً إلى الانفصال عند خلطه أو صبه بالطرق التقليدية فإنه يفضل استخدام البيتون الثقيل مسبق الرص (Prepacked Concrete) والذي يعتبر أكثر مناسبة في هذه الحالة. ويصنع البيتون مسبق الرص من دفع وضخ المونة خلال فراغات ركام نظيف ومرصوص ومدموك جيداً ومشبع بالماء. وعندما تضخ المونة خلال القوالب فتزيح ما بها من ماء وهواء وتملأ الفراغات وبذلك تنتج بيتون ذي كثافة عالية به نسبة عالية من الركام. ويميز هذا البيتون سهولة صبه في بعض المناطق أو الأحوال التي يصعب فيها صب البيتون التقليدي.

10- البيتون الكتلي: (Mass Concrete)

وهو بيتون ذو كتل كبيرة مثل بيتون السدود والخزانات الارضية أو أي بيتون بحيث يكون حجمه من الكبر بحيث يتطلب ذلك أخذ الاحتياطات من تولد الحرارة الناتجة من إماهة الإسمنت وما يتبع ذلك من انكماش وتشريخ للبيتون. ويستخدم في البيتون الكتلي ركام كبير قد يصل مقاسه حوالي 15 cm. ونظراً لوجود حرارة تفاعل عالية من الإسمنت فإنه ينبغي أخذ بعض الاحتياطات الضرورية مثل:

- استخدام إسمنت من النوع منخفض الحرارة (Low heat).
- استخدام محتوى قليل من الإسمنت (خلطة فقيرة Lean mix).
- استبدال نسبة من $(10-20)\%$ من الإسمنت بمادة بوزولانية مثل غبار السيلكا أو

الرماد المتطاير.

–استخدام الثلج المجروش بدلاً من جزء من ماء الخلط وتسمى هذه العملية بالتبريد السابق.

– وجود مواسير رفيعة من الصلب رقيق الجدران داخل الكتلة البيتونية تمر خلالها دورات من الماء البارد لخفض الحرارة وتسمى هذه العملية بالتبريد اللاحق.

– الصب على طبقات قليلة الارتفاع بحد أقصى 1 m.

– العزل السطحي للبيتون برقائق من البوليسترين أو اليوريثان وذلك بغرض تنظيم معدل هبوط الحرارة بحيث يقل فرق الإجهاد الناتج من الهبوط السريع لدرجة الحرارة عند سطح البيتون وداخله.