المحاضرة السادسة

تفاعلات الماء مع مكونات الإسمنت

6-1 تفاعلات الإماهة

يُدعى التفاعل بين الإسمنت والماء بتفاعل إماهة الإسمنت، يشمل هذا التفاعل عدة تفاعلات وهي: تفاعل إماهة C_3S وتفاعل إماهة C_2S وتفاعل إماهة C_3A وتفاعل إماهة C_4AF. إن هذه التفاعلات تؤدي إلى تشكل نواتج جديدة بعضها له خواص رابطة يساهم في ربط الإسمنت مع الرمال والحصويات لتشكيل الحجر الإسمنتي، وبعضها الآخر ليس له دور رابط، إن دراسة هذه التفاعلات يساعد على فهم أفضل لعملية تصلب الإسمنت ومعرفة صفات وخواص الخرسانة.

6-2 تفاعل إماهة سيليكات ثلاثية الكالسيوم C_3S:

إن سيليكات ثلاثية الكالسيوم تشكل الجزء الأكبر من الإسمنت البورتلاندي وهي مسؤولة عن معظم قوى الترابط والتماسك للإسمنت المتصلب. تنشأ قوى الترابط في العجينة الإسمنتية نتيجة تفاعل C_3S مع الماء حيث تتشكل مادتان هما: **سيليكات الكالسيوم المائية** ويعود إليها سبب الترابط، **وماءات الكالسيوم** وهي مادة بلورية غير رابطة. إن C_3S مادة شرهة للماء ذات لون أبيض تتألف من شبكة بلورية من عدة مجموعات من السيليكا ترتبط مع بعضها عبر شوارد الكالسيوم والأكسجين. عندما يُمزج C_3S مع الماء يبدأ تفاعل الإماهة وتظهر في المحلول شوارد الكالسيوم والماءات والسيليكات. تكتب معادلة تفاعل إماهة C_3S باستخدام الرموز الكيميائية التقليدية وفق الشكل التالي:

$$2Ca_3SiO_5 + (y+z)H_2O \rightarrow (CaO)_x.(SiO_2)_2.(H_2O)_y + zCa(OH)_2 + \text{حرارة}$$

حيث: $y+z$= عدد جزيئات الماء اللازمة للتفاعل

Z= عدد جزيئات ماءات الكالسيوم الناتجة

X= عدد جزيئات أكسيد الكالسيوم المرتبطة مع جزيئتين من السيليكا

إن قيم x,y,z تتغير أثناء التفاعل ثم تأخذ قيماً محددة بعد انتهاء التفاعل، ففي بداية التفاعل تكون النسبة $\frac{CaO}{SiO2}$=2 ، أما عند انتهاء التفاعل تصبح النسبة $\frac{CaO}{SiO2}$≈1.5 ،وهذا يدل على أن تركيب سيليكات الكالسيوم المائية يتغير مع الزمن.

يمكن إعادة كتابة المعادلة باستخدام الرموز الخاصة بكيمياء الإسمنت على الشكل المبسط التالي:

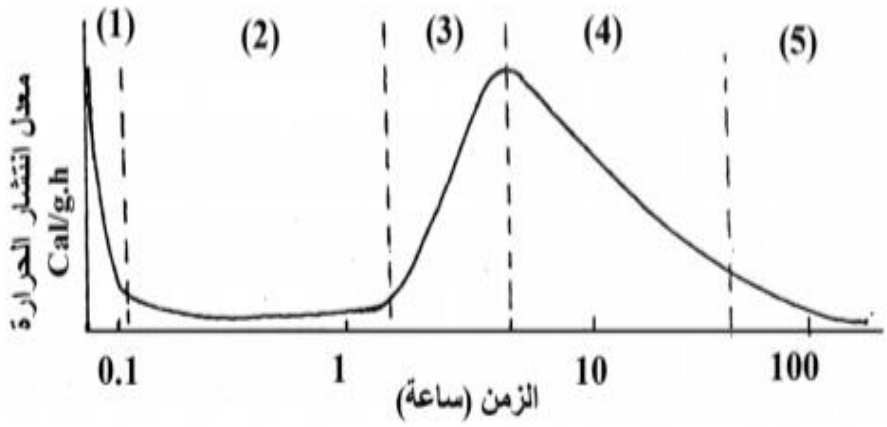
$$2C_3S + (y+z)H \rightarrow C_x.S_2.H_y + zCH + \text{حرارة}$$

وباعتماد النسبة $\frac{C}{S}$≈1.5 التي تستقر عندها في نهاية التفاعل تصبح المعادلة على الشكل التقريبي التالي:

$$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH \qquad \Delta H = -1114\ Kj.mol^{-1}$$

وباعتبار أن الأمثال في صيغة سيليكات الكالسيوم المائية $C_3S_2H_3$ تقريبية فيفضل البعض كتابتها بشكل أبسط وهو $C-S-H$ دون تحديد أرقام للأمثال.

يمر التفاعل بين C_3S والماء بعدة مراحل تميزه عن التفاعلات الأخرى، ففي الدقائق الأولى من التفاعل يحصل تفاعل سريع جداً لايلبث أن يتوقف ويدوم التوقف نحو ساعتين ثم يتسارع من جديد ويصل إلى قيمة عظمى بعد نحو 10 ساعات ثم يتباطأ تدريجياً على مدى أشهر وحتى انتهاء التفاعل. لرسم الخط البياني الممثل لسرعة التفاعل بدلالة الزمن يجب قياس سرعة التفاعل وهذا يتم عادة بقياس تناقص تركيز إحدى المواد المتفاعلة في واحدة الزمن، أو قياس تزايد تركيز إحدى المواد الناتجة عن التفاعل في واحدة الزمن. في حالة تفاعل إماهة C_3S يكون قياس التراكيز صعباً والأسلوب الأسهل من ذلك هو قياس معدل انتشار الحرارة إذ تعد الحرارة المنتشرة من التفاعل وكأنها أحد نواتج التفاعل وتتناسب كمية الحرارة المنتشرة في واحدة الزمن مع كمية المادة المتفاعلة في واحدة الزمن أي مع سرعة التفاعل. يتم قياس معدل انتشار الحرارة أثناء تفاعل إماهة C_3S بوضع كمية من C_3S مع الماء في وعاء مغلق معزول بمزدوجة كهرحرارية تسجل الفرق في درجات الحرارة وتحوله إلى إشارة كهربائية وتُحوَل إلى جهاز راسم يسجل معدل انتشار الحرارة على المحور الشاقولي والزمن على المحور الأفقي فنحصل على مخطط يمثل سرعة تفاعل إماهة C_3S بدلالة الزمن.



الشكل (1-6): سرعة تفاعل إماهة C_3S بدلالة الزمن

1-2-6 مراحل إماهة C_3S:

تمر إماهة C_3S بالمراحل التالية:

1- مرحلة التفاعل الأولي السريع:

يتم في الدقائق الأولى بعد مزج C_3S مع الماء حيث يكون التفاعل سريعاً جداً لايلبث أن يتباطأ بسرعة حتى يكاد يتوقف خلال دقائق قليلة وتدوم هذه الفترة نحو عشر دقائق. إن كمية C_3S التي تتفاعل خلال هذه المرحلة صغيرة جداً لاتتجاوز 1-2% من كمية C_3S الكلية، وهي الطبقة السطحية الخارجية من حبيبات C_3S. ينتج عن التفاعل شوارد الكالسيوم والماءات والسيليكات التي تنتقل إلى المحلول وترتفع قيمة pH. إن التحول من تفاعل سريع إلى تباطؤ يعني أن حدثاً ما أثر على التفاعل وأدى إلى توقفه بعد نحو عشر دقائق.

2- مرحلة الخمول:

وهي الفترة التي يتوقف فيها التفاعل تقريباً بين C_3S والماء نتيجة الحدث الذي طرأ على التفاعل في المرحلة الأولى. تدوم هذه الفترة نحو ساعة ونصف إلى ساعتين. يستمر انتقال شوارد الكالسيوم والماءات إلى المحلول المائي وترتفع قيمة pH ويصل تركيز شوارد الكالسيوم إلى قيمة عظمى في نهاية هذه المرحلة. بما أن كمية C_3S المتفاعلة حتى نهاية هذه المرحلة لاتتجاوز 2% فإن المادة الرابطة المتشكلة صغيرة جداً لاتكفي لبدء تماسك وتصلب العجينة الإسمنتية، لذلك تبقى عجينة C_3S بالحالة الطرية العجينية وهذا هام جداً من الناحية العملية لأن بقاء الخلطة الإسمنتية بشكلها العجيني الطري مدة أكثر من ساعة يمكِن العمال من الانتهاء من عمليات الخلط الجيد للإسمنت مع الرمل والحصويات والماء لتشكيل العجينة ثم نقلها وصبها في القوالب ورجها ودمكها حتى تملأ كل الفجوات في القالب قبل أن تبدأ بالتصلب. لو أن مرحلة الخمول لم تكن موجودة لاختلف أسلوب العمل في البناء جذرياً لأن المدة الفاصلة بين المزج وبدء التصلب تكون بضع دقائق فقط.

إن انتهاء فترة الخمول واستئناف التفاعل من جديد يعني أن الحدث الذي أدى إلى توقف التفاعل في المرحلة الأولى لم يعد قائماً في نهاية مرحلة الخمول وهذا يدل على أن تحولاً ما يحصل خلال فترة الخمول يقود في النهاية إلى انتهاء فترة الخمول وبدء مرحلة التسارع، لايوجد تفسير قاطع لهذا التحول وتوجد أكثر من نظرية لشرح هذا التحول يتم عرضها في الفقرات القادمة..

3- مرحلة التسارع:

وهي المرحلة التي تعقب فترة الخمول ويبدأ فيها التفاعل بين C_3S والماء من جديد ويتسارع التفاعل خلال بضع ساعات حتى يصل إلى قيمة عظمى بعد نحو 10 ساعات. تتشكل في هذه المرحلة كميات متزايدة من المادة الرابطة وهي سيليكات الكالسيوم المائية $C-S-H$ فتبدأ العجينة بالتماسك في بداية هذه المرحلة وهذا مايُطلق عليه اسم عملية بداية الأخذ أو الشك للإسمنت والمقصود بذلك الزمن اللازم حتى تكتسب العجينة الإسمنتية بعض التماسك الذي يحدَد مقداره بمدى اختراق إبرة قياسية للعجينة الإسمنتية. ثم يزداد التماسك مع استمرار التفاعل إلى أن يصل إلى قيمة أخرى تستطيع العجينة مقاومة مقدار محدد من الضغط وتدعى هذه النقطة نهاية الأخذ وتكون عادة بعد عدة ساعات من المزج. تترافق عملية الأخذ مع ظهور بلورات ماءات الكالسيوم الصلبة بشكل موشور سداسي منتظم، وتنتشر كمية كبيرة من الحرارة بسبب التفاعل.

4- مرحلة التباطؤ:

وهي المرحلة التي تتناقص فيها سرعة التفاعل بعد أن تصل إلى قيمتها العظمى في نهاية مرحلة التسارع، وتستمر عدة أيام يتشكل فيها المزيد من المادة الرابطة $C-S-H$ وتزداد المقاومة مع مرور الزمن كما يزداد تباطؤ التفاعل وحتى نهاية هذه المرحلة بعد بضعة أيام. في نهاية هذه المرحلة يكون الجزء الأكبر من C_3S قد تفاعل مع الماء.

5- مرحلة انتهاء التفاعل:

وهي مرحلة إتمام التفاعل وتعد امتداداً لمرحلة التباطؤ لكنها تستغرق وقتاً أطول بكثير يصل إلى عدة أشهر يستمر فيه التفاعل ببطء شديد ويتفاعل ماتبقى من C_3S مع الماء.

6-2-2 آلية تفاعل إماهة C_3S:

على الرغم من معرفة مراحل إماهة C_3S ومايحدث في كل مرحلة إلا أن تفسير السبب وراء تباطؤ التفاعل في مرحلة التفاعل الأولي السريع وبدء مرحلة الخمول والسبب وراء انتهاء مرحلة الخمول وبداية مرحلة التسارع مازال غير متفق عليه، وتوجد نظريتان رئيسيتان لتفسير آلية التفاعل، الأولى هي نظرية تشكل الطبقة الواقية، والثانية نظرية تأخر تشكل ونمو بلورات ماءات الكالسيوم، سنحاول فيمايلي شرح هاتين النظريتين.

<u>أولاً نظرية تشكل الطبقة الواقية:</u>

وتنص على أن حبيبات C_3S تتفاعل بسرعة مع الماء فور المزج مباشرةً ويتركز التفاعل على السطح الخارجي لحبيبات C_3S حيث يحصل تماس بين C_3S والماء، ينتج عن هذا التفاعل شوارد سيليكاتية وشوارد الكالسيوم وشوارد الماءات وتتركز هذه الشوارد على محيط حبيبات C_3S بسماكة نحو $50A^\circ$ أي نحو خمسة أجزاء من المليون من الميلي متر فهي إذاً قشرة رقيقة هلامية غنية بالشوارد، ترتبط هذه الشوارد مع بعضها لتشكيل سيليكات الكالسيوم المائية $C-S-H$ تكون فيها النسبة بين أكسيد الكالسيوم والسيليكا $\frac{C}{S}\approx 2$ وهذه الطبقة تكون غير نفوذة للماء تحول دون استمرار التفاعل بين الماء خارج هذه الطبقة و C_3S الموجودة داخل الطبقة. يُرمز لهذا النوع من سيليكات الكالسيوم المائية غير النفوذة للماء بـ **(I)** $C-S-H$. إذاً تشكل **(I)** $C-S-H$ يؤذن بانتهاء مرحلة التفاعل الأولي السريع وبدء مرحلة الخمول عند اكتمال تشكل هذه الطبقة. أثناء مرحلة الخمول يحصل تحول في تركيب $C-S-H$ كما يدل على ذلك تغير النسبة $\frac{C}{S}$ إذ تتناقص تدريجياً لتصبح في النهاية $\frac{C}{S}\approx 1.5$ ويُرمز لسيليكات الكالسيوم المائية هذه بالرمز **(II)**$C-S-H$ وتكون نفوذة للماء لذلك يخترق الماء هذه الطبقة ويصل إلى C_3S ويتفاعل معه وبذلك تنتهي فترة الخمول وتبدأ مرحلة التسارع. إذاً يمكن القول إن سبب انتهاء فترة الخمول وابتداء مرحلة التسارع هو تحول **(I)** $C-S-H$ إلى **(II)** $C-S-H$.

مع استمرار التفاعل خلال مرحلة التسارع يترسب الهلام بشكل قطع صلبة من $C-S-H$ بالإضافة إلى قطع صلبة من بلورات ماءات الكالسيوم حول حبيبات C_3S ويزداد سمك هذه الطبقة الصلبة مما يشكل عائقاً مادياً يجعل مرور الماء ووصوله إلى ماتبقى من C_3S غير المتفاعل أكثر صعوبة لذلك يتباطأ التفاعل بعد نحو عشر ساعات ويزداد التباطؤ مع ازدياد سماكة الطبقة المترسبة حتى انتهاء التفاعل الذي يستغرق عدة أشهر تصل أحياناً إلى سنة.

<u>ثانياً نظرية تأخر تشكل ونمو بلورات ماءات الكالسيوم:</u>

تعد هذه النظرية تفاعل C_3S مع الماء سلسلة من حلقتين أو مرحلتين، المرحلة الأولى هي مرحلة انحلال C_3S الصلب بالماء وتحوله إلى مادة هلامية، والمرحلة الثانية هي ترسب الهلام بشكل $C-S-H$ وبلورات ماءات الكالسيوم. إن إعاقة أي مرحلة من المرحلتين تؤدي إلى إيقاف التفاعل ويعود التفاعل من جديد عندما تزول الإعاقة. إن جوهر هذه النظرية هو أن المرحلة الثانية تتوقف بعد بدء التفاعل بقليل لعدم تمكن ماءات الكالسيوم من تشكيل بلورات صلبة أو لعدم تمكن البلورات من النمو والترسب.

استنتج أصحاب هذه النظرية أن وجود آثار من السيليكا يؤخر تشكل ونمو بلورات ماءات الكالسيوم وهذه الإعاقة تؤخر عملية ترسب الهلام وتوقف أيضاً المرحلة الأولى وهي انحلال C_3S لتشكيل الهلام، لذلك يتوقف التفاعل بكامله وتبدأ مرحلة الخمول، ويُقال إن للسيليكا المنحلة تأثيراً مسمماً لتشكيل ونمو بلورات ماءات الكالسيوم يدوم تأثيره نحو ساعتين، وعندما يرتفع تركيز الشوارد إلى مايفوق حد الإشباع بمرة ونصف تقريباً يتم التغلب على التأثير المسمم للسيليكا ربما بتشكل بلورات جديدة من ماءات الكالسيوم. إذاً تفسر هذه النظرية بدء فترة الخمول بسبب منع ماءات الكالسيوم من الترسب نظراً لوجود السيليكا المنحلة، وتنتهي فترة الخمول ويبدأ التفاعل بالتسارع عندما تتمكن بلورات ماءات الكالسيوم من التشكل والنمو.

6-3 تفاعل إماهة C_2S:

يتفاعل C_2S مع الماء بشكل مشابه تقريباً إلى تفاعل إماهة C_3S لكن بطيء جداً بمقارنته مع تفاعل إماهة C_3S، ويكون أقل نشراً للحرارة. نواتج إماهة C_2S هي نفس نواتج إماهة C_3S وتعطى معادلة تفاعل إماهة C_2S على الشكل التالي:

$$2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH \qquad \Delta H = -43\ KJ.mol^{-1}$$

يصعب تتبع سير التفاعل بالتفصيل كما كان الأمر مع C_3S نظراً لبطء تفاعل الإماهة وقلة الحرارة المنتشرة عن التفاعل، لكن الشكل العام للمنحني الناتج عن رسم سرعة التفاعل بدلالة الزمن يشابه المنحني الناتج عن إماهة C_3S.

ينتج عن تفاعل إماهة C_2S نفس المادة الرابطة $C-S-H$ الناتجة عن إماهة C_3S، لكن تشكلها بشكل بطيء يغير قليلاً من شكلها وكيفية توضعها وارتباطها، ومع ذلك يعد C_2S المادة الثانية في الأهمية والسؤولة عن إكساب الحجر الإسمنتي الصلابة والتماسك.

6-4 تفاعل إماهة C_3A:

إن ألومينات ثلاثية الكالسيوم C_3A هي أسرع مكونات الإسمنت تفاعلاً مع الماء وأكثرها نشراً للحرارة. يعطي تفاعل C_3A مع الماء ناتجين هما: C_4AH_{13} و C_2AH_8 وهذه المركبات غير ثابتة سرعان ماتتفاعل مع بعضها لتعطي C_3AH_6 حسب المعادلات:

$$2C_3A + 21H \rightarrow C_4AH_{13} + C_2AH_8$$

$$C_4AH_{13} + C_2AH_8 \rightarrow 2C_3AH_6 + 9H$$

هذه التفاعلات سريعة وناشرة لحرارة كبيرة وهذا غبر مرغوب فيه من الناحية العملية لسببين: **الأول** هو تحول العجينة الإسمنتية إلى حالة من الجمود خلال دقائق بعد المزج مع الماء تدعى الجمود السريع مما يفقد الخلطة الصفة العجينية المرنة ويقلل مايسمى بقابلية التشغيل وهذا يعيق عملية الصب، **والثاني** هو انتشار كمية كبيرة من الحرارة في المراحل الأولى من التفاعل مما يزيد احتمال حصول تشققات حرارية.

لذلك يجب كبح جماح التفاعل السريع لـ C_3A ويتحقق ذلك بوجود الجص الذي أضيف إلى الكلينكر أثناء طحنه. يتفاعل الجص بسرعة مع الطبقة السطحية لـ C_3A بوجود الماء وتتشكل طبقة كتيمة

تغلف حبيبات C_3A وتمنع استمرار تفاعلها مع الماء، تدعى هذه الطبقة الايترينايت أو الايترينجيت (Ettringite) وصيغتها $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ حسب المعادلة:

$$C_3A + 3C\bar{S}H_2 + 26H \rightarrow C_6A\bar{S}_3H_{32}$$

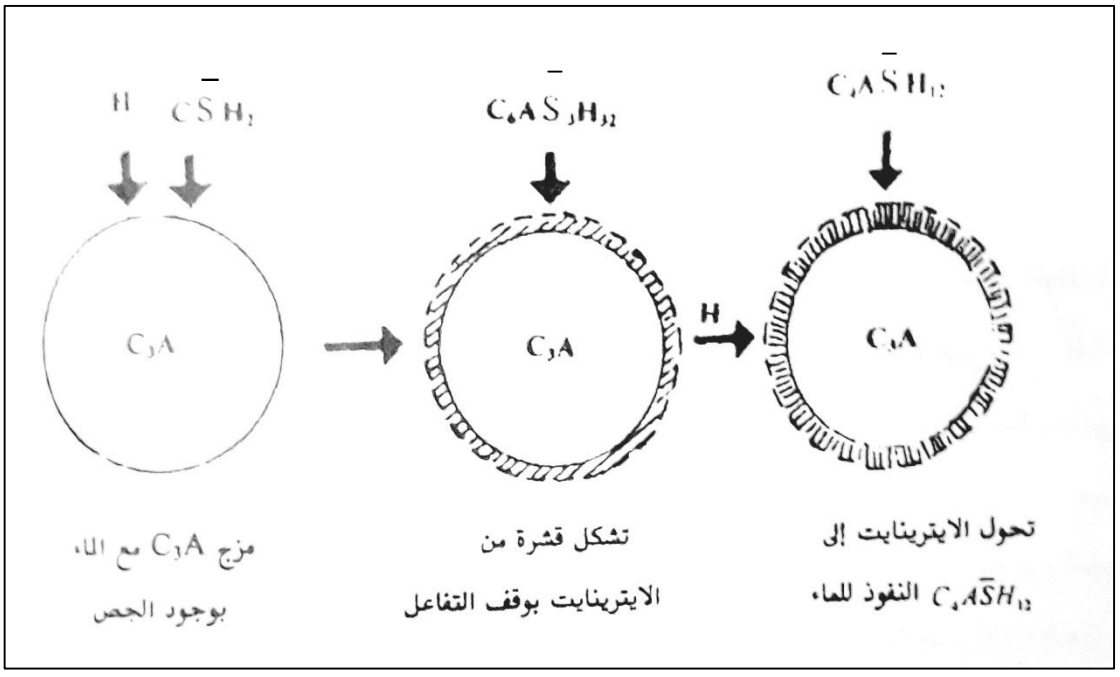
لايستمر بقاء مادة الايترينايت طويلاً إذ تتفاعل مع C_3A بوجود الماء لتتشكل مادة جديدة هي أحادي سلفوألومينات $C_4A\bar{S}H_{12}$:

$$C_6A\bar{S}_3H_{32} + 2C_3A + 4H \rightarrow 3C_4A\bar{S}H_{12}$$

(ايترينايت) (أحادي سلفو ألومينات)

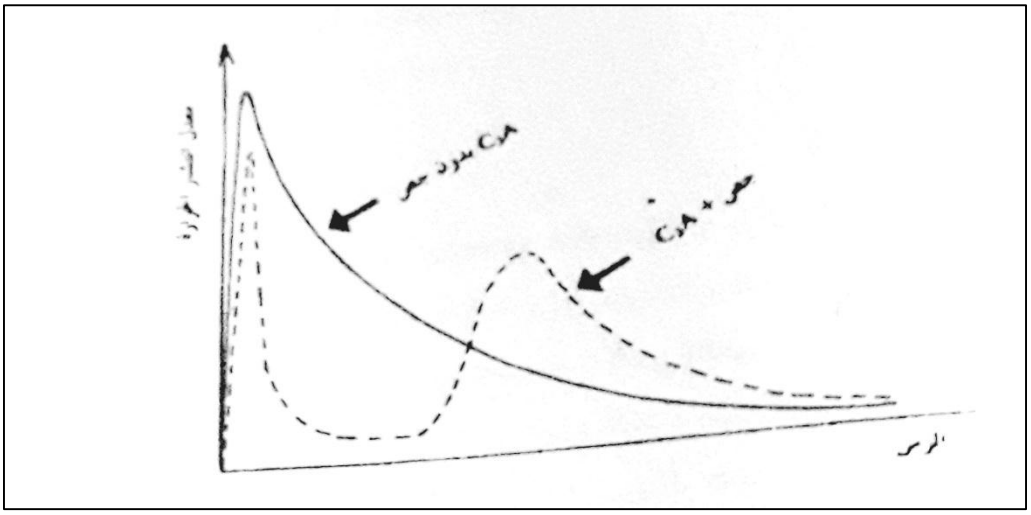
إن أحادي سلفوألومينات نفوذة للماء، لذلك يعود الماء إلى التفاعل مع C_3A فيتسارع التفاعل حتى يبلغ قيمة عظمى بعد نحو 20-36 ساعة ثم يتباطأ حتى ينتهي.

يوضح الشكل (2-6) تشكل طبقة الايترينايت حول حبيبات C_3A ثم تحول الايترينايت إلى أحادي سلفوألومينات.



الشكل (2-6): إماهة C_3A بوجود الجص

إن أثر تشكل طبقة الايترينايت حول حبيبات C_3S ثم زوالها يشابه الأثر الناتج عن تشكل الطبقة الواقية حول حبيبات C_3S عند الإماهة. يبين الشكل التالي معدل انتشار الحرارة أثناء إماهة C_3A بوجود الجص وبدونه.



الشكل (3-6): سرعة تفاعل إماهة C_3A مع الجص وبدونه

6-5 تفاعل إماهة C_4AF:

يتفاعل C_4AF بشكل مشابه لتفاعل C_3A لكن التفاعل أبطأ وأقل نشراً للحرارة لذلك لايسبب ذلك عملياً مشكلة الجمود السريع التي يسببها تفاعل إماهة C_3A. وبوجود الجص في الإسمنت يكون تفاعل C_4AF أكثر بطأً. ينتج عن التفاعل بغياب الجص مركبات مشابهة لتلك التي تنتج عن إماهة C_3A بغياب الجص، إضافة إلى المركبات التي تنتج من استبدال أكسيد الحديد بأكسيد الألمنيوم مثل C_4FH_{13} و C_3FH_6 و C_2FH_8. أما بوجود الجص فيتشكل أحادي سلفوحديدات بالإضافة إلى أحادي سلفوألومينات وتمثل صيغة المركبين بالصيغة العامة التالية: $C_4(A,F)\,\bar{S}\,H_{12}$ كما يتشكل مركب مشابه للايترينايت يحوي أكسيد الحديد بدلاً من أكسيد الألمنيوم صيغته: $C_6F\bar{S}_3H_{32}$.

6-6 تفاعل إماهة الإسمنت والعوامل المؤثرة عليه:

إن الدراسة السابقة لتفاعلات إماهة مكونات الإسمنت كانت تفترض أن كل مادة تتفاعل لوحدها مع الماء، لكن عندما يتفاعل الإسمنت "وهو مزيج من عدة مركبات" مع الماء فربما تتأثر التفاعلات الخاصة بكل مكون لوجود المكونات الأخرى المرافقة، فما هو تأثير وجود مكونات الإسمنت مع بعضها على تفاعلات الإماهة؟؟

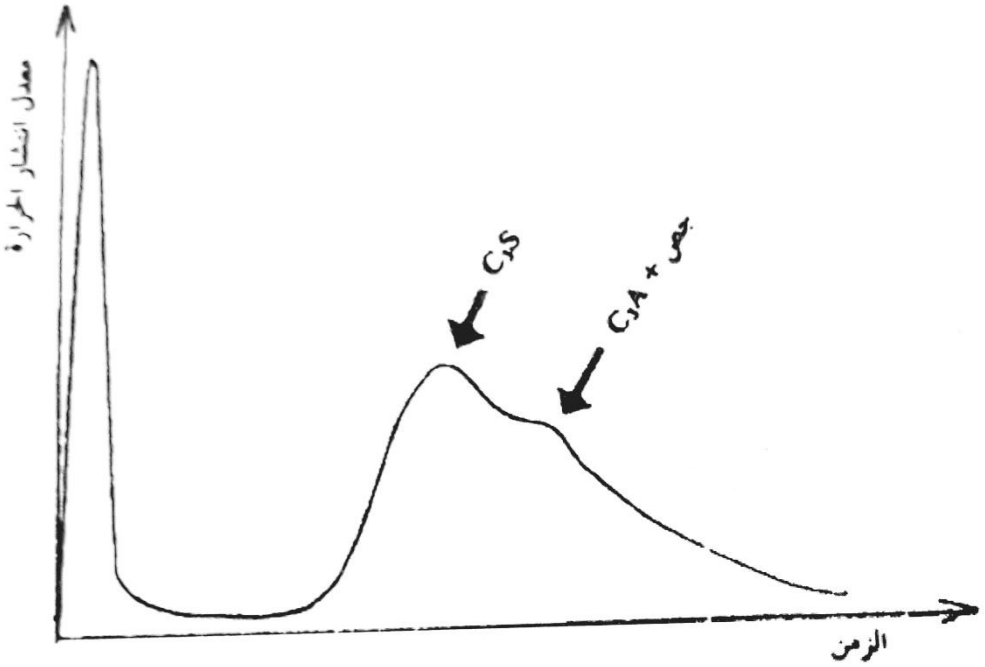
6-6-1 تفاعلات إماهة الإسمنت:

عندما يُضاف الماء إلى الإسمنت تبدأ تفاعلات الإماهة وفق الإطار العام الذي تحددت معالمه عند مناقشة تفاعلات الإماهة لكل مكون على حدى. فوجود عدة مركبات إلى جوار بعضها لايؤثر على الاتجاه العام للتفاعلات ويقتصر التأثير على بعض الأمور الثانوية والتي لا تغير المجرى العام للتفاعل، فيمكن مثلاً لبعض التفاعلات أن تصبح أسرع قليلاً أو أبطأ قليلاً، وقد تبدو مادة أكثر نشاطاً مما يتوقع، لكن هذا لا يغير المنحى العام للتفاعل.

يتأثر تفاعل إماهة C_3S قليلاً بوجود C_3A إذ إن التفاعل السريع لـC_3A يعطي المزيد من شوارد الكالسيوم للمحلول، وهذه الزيادة تساعد على إنهاء فترة الخمول بوقت أقصر قليلاً، ويقصر لذلك زمن بداية الأخذ بضع دقائق ربما. ويُتوقع أن يكون تفاعل C_4AF بوجود الجص بطيئاً جداً، لكن في الإسمنت يبدو أن هذا التفاعل يكون أكثر نشاطاً وأسرع مما هو متوقع والسبب هو وجود C_3A

الشره للتفاعل مع الجص حيث يستهلك الجزء الأكبر من الجص في المراحل المبكرة من التفاعل تاركاً C_4AF بدون كمية كافية من الجص تؤخر تفاعله لذلك يكون أكثر نشاطاً وأسرع تفاعلاً مع الماء.

إن تتبع سرعة تفاعل إماهة الإسمنت كخليط يمكن أن يتم بقياس معدل انتشار الحرارة كما هو الحال عند إماهة C_3S، ويظهر الشكل (4-6) معدل انتشار الحرارة بدلالة الزمن عند إماهة الإسمنت كخليط.



الشكل (4-6): سرعة تفاعل إماهة الإسمنت بدلالة الزمن

يلاحظ من الشكل التشابه مع المخطط البياني الممثل لتفاعل إماهة C_3S مع وجود قمة أخرى تنتشر فيها كمية إضافية من الحرارة تكون عادة إلى يمين القمة الأولى. تعود القمة الأولى إلى تفاعل إماهة C_3S بعد نحو 10 ساعات، أما القمة الثانية وتكون بعد نحو 36-20 ساعة فتعود إلى تفاعل إماهة C_3A بوجود الجص، ويمكن أن يتغير موضع القمة الثانية إلى اليمين عند وجود زيادة من الجص التي تشكل طبقة من الايترينايت أكثر سماكة وتحتاج إلى وقت أطول حتى تتغير إلى أحادي سلفوألومينات، أما إذا كانت كمية الجص قليلة فتنزاح القمة الثانية إلى اليسار وتندمج مع القمة العائدة إلى إماهة C_3S.

6-6-2 تأثير نعومة الإسمنت على تفاعلات الإماهة:

عندما يُمزج الإسمنت مع الماء فإن التفاعل بينهما يبدأ على السطح الفاصل بين حبيبات الإسمنت والماء، وباعتبار أن المساحة السطحية لحبيبات الإسمنت تزداد مع زيادة النعومة فإن كمية الإسمنت المتفاعلة تتناسب طرداً مع نعومة الإسمنت وهذا يؤدي إلى زيادة ملحوظة في المقاومة المبكرة ونحصل على إسمنت سريع التصلب، لكن المقاومة النهائية تتعلق بكمية المادة الرابطة المتشكلة C – S – H وبكيفية توزعها في الخلطة الإسمنتية، وعليه إذا قارنا مقاومة عينتين من الخرسانة الأولى فيها 1 Kg اسمنت ناعم والثانية فيها 1 Kg اسمنت خشن نجد أن مقاومة العينة ذات الإسمنت الناعم أكبر من مقاومة العينة ذات الإسمنت الخشن، يكون الفرق في المقاومة كبيراً

في المراحل الأولى من التصلب ويتناقص الفرق في المقاومة مع استمرار التفاعل وحتى إتمام التفاعل.

قد نتوقع أن تكون مقاومة العينتين متساوية عند انتهاء التفاعل لأنهما تحويان نفس الكمية من الإسمنت وتتشكل نفس الكمية من المادة الرابطة C – S – H سواء كان الإسمنت ناعماً أو خشناً، لكن العينة ذات الإسمنت الناعم تبدي مقاومة نهائية أعلى قليلاً من العينة ذات الإسمنت الخشن ويعود ذلك إلى توزع الإسمنت الناعم في الخلطة بشكل أفضل وأكثر تجانساً.

يتضح مما سبق أن زيادة نعومة الإسمنت له نتائج إيجابية في زيادة المقاومة، لذلك يمكن الحصول على إسمنت سريع التصلب يتمتع بمقاومة مبكرة عالية ويصلح للاستعمال في أعمال الترميم، لكن زيادة نعومة الإسمنت بشكل كبير له محاذير عدة أهمها:

1- ارتفاع كبير في كمية الحرارة المنتشرة في المراحل الأولى من التفاعل مما يزيد من احتمال التشقق الحراري.

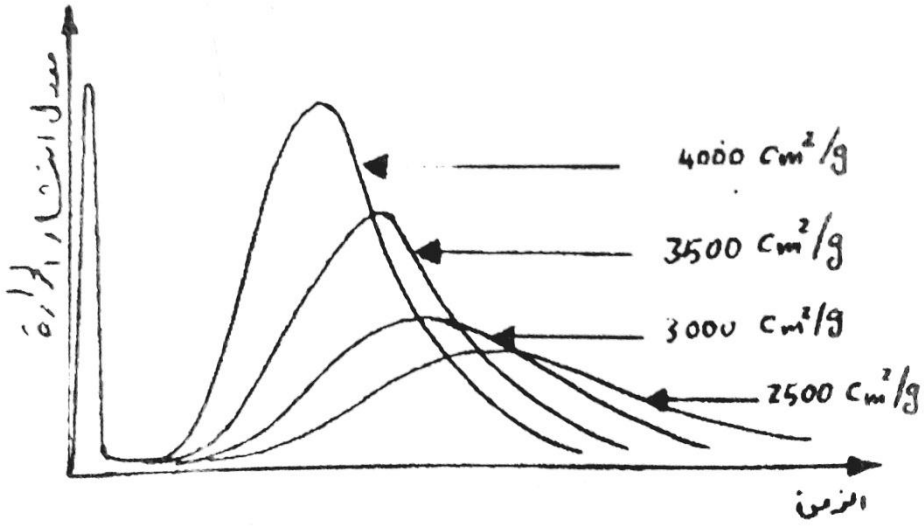
2- زيادة كبيرة في كلفة الطحن.

3- قصر مدة صلاحية الإسمنت فالسطح الواسع لحبيبات الإسمنت الناعم يدمص على سطحه بعض الرطوبة من الهواء مما يفقد الإسمنت بعض فعاليته.

4- ظهور بعض التشققات بعد التصلب نتيجة عملية التقلص والتي تزداد بزيادة نعومة الإسمنت.

6-6-3 تأثير نعومة الإسمنت على انتشار حرارة الإماهة:

كلما زادت نعومة الإسمنت يتفاعل الجزء الأكبر منه في المراحل الأولى وتنتشر الكمية الأكبر من الحرارة في وقت مبكر. إن كمية الحرارة الكلية المنتشرة عند تفاعل كمية ثابتة من الإسمنت هي نفسها سواء كان الإسمنت ناعماً أو خشناً، لكن شكل الخط البياني الممثل لمعدل انتشار الحرارة بدلالة الزمن يختلف مع اختلاف النعومة، كما هو موضح في الشكل (5-6):



الشكل (5-6): معدل انتشار الحرارة بدلالة الزمن لإسمنت مختلف النعومة

6-6-4 تأثير درجة حرارة الإنضاج على المقاومة:

المقصود بالإنضاج هو وضع العجينة الإسمنتية في الظروف والشروط المناسبة لإتمام تفاعلات الإماهة، من هذه الظروف الخاصة بالإنضاج درجة الحرارة التي يتم فيها التفاعل وتدعى درجة حرارة الإنضاج.

في الحالات القياسية عند إجراء التجارب في المخابر يتم الإنضاج في الدرجة $20 \pm 1C^{\circ}$ ويتم ذلك بوضع عينات الخرسانة بالماء بعد فكها من القالب في اليوم التالي لعملية الصب وتكون درجة حرارة المستودع المائي مثبتة في المجال $20 \pm 1C^{\circ}$ وتبقى في هذه الدرجة حتى موعد كسر العينة، ندعو هذه العينة القياسية **بالعينة الشاهد**.

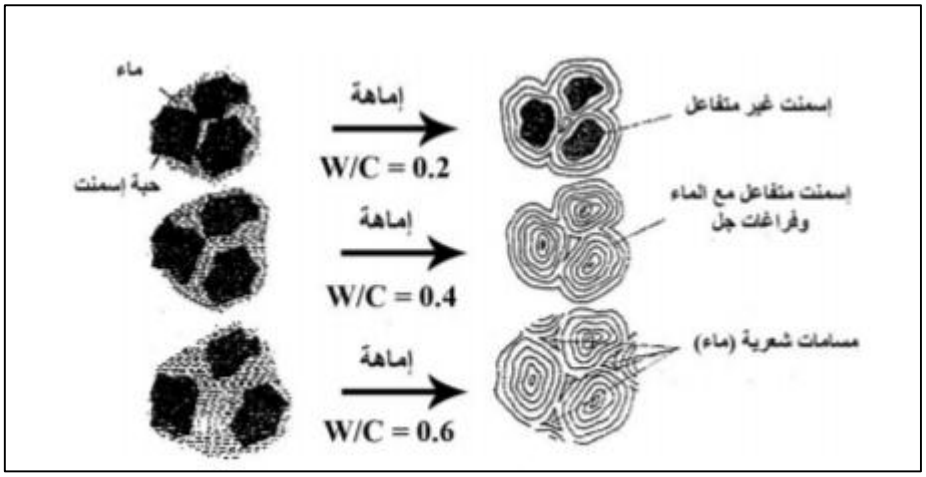
إذا تمت عملية الإنضاج بدرجات حرارة منخفضة بالدرجة $5C^{\circ}$ مثلاً فإن المقاومة المبكرة تكون منخفضة بسبب بطء التفاعل بدرجات حرارة منخفضة، لكن بعد عدة أيام تزداد المقاومة لتصبح مساوية إلى مقاومة العينة الشاهد ثم تتجاوزها إلى قيمة أعلى.

أما إذا تمت عملية الإنضاج بدرجات حرارة أعلى من الدرجة القياسية، الدرجة $35C^{\circ}$ مثلاً، فإن المقاومة المبكرة تكون أعلى من مقاومة العينة الشاهد، لكن بعد عدة أيام تصبح مساوية للعينة الشاهد، وعلى المدى البعيد عندما ينتهي التفاعل تصبح مقاومة العينة أقل من مقاومة العينة الشاهد. والسبب في ذلك هو أن الإنضاج بدرجة حرارة عالية يسرع التفاعل في المراحل الأولى وتتحول العجينة الإسمنتية بسرعة إلى الحالة المتصلبة مما يحد من إمكانية توزع حبيبات الإسمنت بشكل أكثر تجانساً في العينة. أما في الإنضاج بدرجات حرارة منخفضة فيعطي مقاومة نهائية مرتفعة لأن بقاء العجينة الإسمنتية بشكلها الطري لفترة أطول يتيح توزع حبيبات الإسمنت بشكل أكثر تجانساً مما ينعكس إيجابياً على المقاومة النهائية.

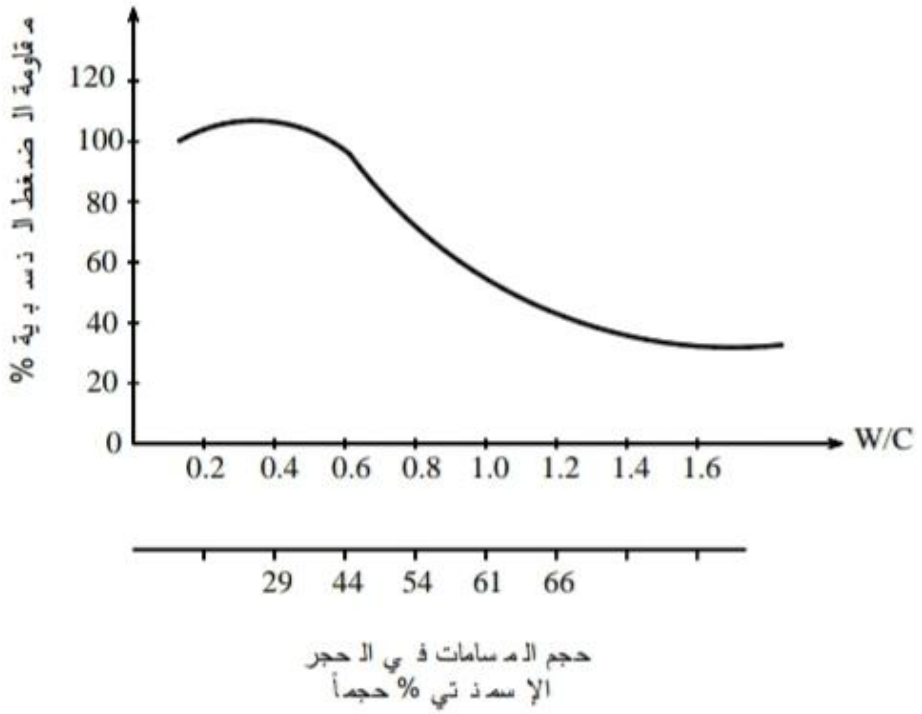
6-6-5 تأثير نسبة الماء إلى الإسمنت:

تعد نسبة وزن الماء إلى وزن الإسمنت W/C من أهم العوامل التي تؤثر على تماسك الإسمنت وتصلبه وإكسابه مقاومة عالية. إن وزن الماء اللازم نظرياً لإتمام تفاعل 100 g من الإسمنت هو 24 g ماء وعليه فإن النسبة $W/C = 0.24$، لكن باستعمال هذه النسبة فإن إماهة الإسمنت لا تتم بشكل كامل وتبقى كمية من الإسمنت غير متفاعلة.

وُجد أن المقاومة تكون عظمى من أجل $\frac{W}{C} = 0.4$ ، أما كمية الماء الزائدة عن المقدار اللازم للتفاعل فقسم منها يتبخر، وقسم منها يبقى ضمن المسامات الداخلية على سطوح الطبقات المتشكلة من C – S – H وضمن المسامات الشعرية. أما إذا زادت نسبة الماء للإسمنت وكانت $\frac{W}{C} > 0.4$ فإن المقاومة تتناقص كما هو مبين في الشكلين (6-6) و (6-7).



الشكل (6-6): تأثير نسبة W/C على هيكل الحجر الإسمنتي



الشكل (7-6): تغير مقاومة العجينة الإسمنتية بدلالة نسبة الماء إلى الإسمنت

إن سبب تناقص مقاومة الإسمنت بزيادة النسبة W/C هو أن الماء الزائد سيشغل حجماً من العجينة الإسمنتية، ويتحول هذا الحجم إلى مسامات وفراغات بعد تبخر الماء الزائد. من ناحية أخرى فإن الماء الزائد يؤدي إلى زيادة المسافة مابين نواتج إماهة حبيبات الإسمنت والإقلال من ترابطها، وهذا مايؤدي إلى ضعف تماسك الإسمنت بعد تصلبه.