دراسة تطور مقاومة المونة الإسمنتية باستخدام نوعيّ الإسمنت الأكثر شيوعاً في سوريا (البورتلاندي العادي والمقاوم للكبريتات)

طالبة الدكتوراه: داليا فرج أولاد كلية الهندسة المدنية – جامعة البعث

اشراف الدكتور: مروان الخوري + د. عبد القادر الجندي

ملخص:

يتم اختيار الإسمنت عادةً قبل الشروع في أعمال صبّ البيتون وفقاً لمعايير متعددة تتعلق بنوع المنشأة وموقعها والمقاومة الميكانيكية المطلوبة وتربة التأسيس. لذلك نجد في أحيان كثيرة توصيات باستخدام إسمنت بورتلاندي سريع التصلّب عندما تُطلب مقاومة مبكرة مرتفعة، وإسمنت بورتلاندي ذو حرارة إماهة منخفضة عند صبّ الكتل الضخمة، ومقاوم للكبريتات عند صبّ البيتون في أوساط حاوية على الكبريتات أو غيرها.....

يهدف هذا البحث إلى دراسة الأسباب التي تكمن وراء ظاهرة بطء تصلب البيتون الذي استخدم فيه الإسمنت المقاوم للكبريتات، ألا وهي التركيب الكيميائي المختلف لنوعيّ الإسمنت كما بينت هذه الدراسة. هذه الظاهرة التي تؤخر من وصول البيتون إلى مقاومته النهائية خلافاً للبيتون الذي يُصنع باستخدام الإسمنت البورتلاندي العادي.

تمّ في هذا البحث دراسة تطور المقاومة الميكانيكية مع الزمن على عينات مونة اسمنتية تمّ صبها باستخدام إسمنت بورتلاندي عادي، وإسمنت مقاوم للكبريتات (72 موشور لكل نوع وأبعاد مواشير Cm(4*4*16)) تم أخذ قيم قراءاتها الوسطية.

بعد إجراء الاختبارات اللازمة ودراسة النتائج الخاصة بتطور (المقاومة على الضغط – المقاومة على الشد بالانعطاف – تغير الوزن) مع الزمن لكل من نوعيّ الإسمنت، تم تقييم هذه النتائج ولوحظت زيادة في مقاومة عينات الإسمنت المقاوم للكبريتات على الضغط بنسبة 18% بالمقارنة مع الإسمنت العادي، والمقاومة على الشد بالانعطاف بحدود 20% لصالح الإسمنت البورتلاندي وذلك عند عمر تصلب بلغ 180 يوماً، وتم تحليل أسباب تأخر التصلب، والمقارنة بين نوعيّ الإسمنت المستخدم من حيث النتائج التي تم الحصول عليها.

كلمات مفتاحية: الإسمنت البورتلاندي العادي، الإسمنت المقاوم للكبريتات، تفاعل الإماهة، المقاومة على الضغط، الشد بالانعطاف.

Studying the Development of Cement Mortar Resistance by Using the Two Most Common Types of Cement in Syria (Ordinary Portland and Sulfate Resistant)

Abstract:

Cement is usually selected before concrete work is initiated according to several criteria relating to the type of plant, its location, the required mechanical resistance and the foundation soil. Therefore, we often find recommendations for the use of fast-paced Portland cement when high resistance is required, low-temperature Portland cement when pouring large blocks, and sulfate resistance when pouring concrete into sulfate containers. This research aims to study the reasons behind the slow hardening of concrete in which sulfate-resistant cement was used, which is the different chemical composition of the two types of cement as shown in this study. This is the phenomenon that delays the concrete from reaching its final strength, unlike concrete that is made using ordinary Portland cement. In this research, the development of mechanical resistance over time was studied on cement mortar samples poured using ordinary Portland cement, and sulfate-resistant cement (72 prisms for each type(4*4*16)Cm) whose average readings were taken.

After conducting the necessary tests and studying the results of the development of (resistance on compression - tensile strength on bending - weight change) with time for each of the two types of cement, these results were evaluated and an increase in the resistance of sulfate-resistant cement samples to compression was observed by 18% compared to ordinary cement. The resistance to bending tensile is about 20% in favor of Portland cement at a hardening life of 180 days. The reasons for the delay in hardening were analyzed, and the two types of cement used were analyzed in terms of the results obtained.

Keywords: Ordinary Portland cement, sulfate resistant cement, reaction, concrete hardening.

1-مقدمة:

ينتشر استخدام الإسمنت المقاوم للكبريتات في المواقع التي يمكن أن تظهر فيها أخطار قد تؤثر على ديمومة البيتون بفعل الوسط الذي سيُصبّ فيه، مما يستدعي اتخاذ احتياطات تتعلق باختيار المواد الداخلة في البيتون كالإسمنت مثلاً أو بعض الإضافات الصلبة أو السائلة التي تعمل على إكساب البيتون بعض المواصفات الخاصة التي تجعله يقاوم العوامل المخربة المحيطة به.

تتحدد درجة التأثير المخرب على البيتون حسب الوسط المحيط المهاجم:

فبالنسبة للوسط السائل فإن درجة التأثير تتعلق بوجود العناصر المخربة وبدرجة تركيزها في السائل وتتعلق أيضاً بدرجة الحرارة ومقدار ضغط وسرعة جريان السائل على السطح.

أما بالنسبة للوسط الغازي فتتأثر درجة التخريب بنوع وتركيز الغاز ومقدار انحلاله في الماء ومقدار رطوبة وحرارة الجو المحيط.

أما بالنسبة للمواد الصلبة (أملاح، شوائب) فتتعلق درجة التأثير بحسب تشتت هذه المواد وتركيزها وانحلالها بالماء رطوبة الجو المحيط. [13-12]

تُصنِّف المواصفات العالمية درجة تخريب الوسط عادةً في أربعة مستويات:

الجدول (1) تصنيف الأوساط المخربة وفق المواصفات الفرنسية P 18-305

تصنيف الأوساط المخربة وفق المواصفات الفرنسية P 18-305					
رمز الوسط	وصف الوسط	Co_2 mg/l	So_4^{--} mg/l	Mg^{++} mg/l	PH
A1	ضعيف التخريب الكيميائي (جو منشآت صناعية)	15-30	250-600	300>	5.5-6.5
A2	متوسط التخريب الكيميائي	30-60	600-1500	300-1500	4.5-5.5
A3	عالي التخريب الكيميائي	60-100	1500-6000	1500-3000	4-4.5
A4	شديد التخريب	100>	6000>	3000>	<4

بنفس الوقت يمكن اعتبار التآكل الكيميائي للبيتون الحاصل في وسط غازي وبوجود الرطوبة مشابهاً تماماً للتآكل الحاصل في وسط سائل.

كما يمكن تصنيف الأوساط المخربة حسب مقدار عمق التآكل الكيميائي للبيتون كما في الجدول:

الجدول (2) تصنيف الأوساط المخربة حسب مقدار عمق التآكل الكيميائي للبيتون

درجة التخريب للوسط المائي	عمق التخريب للبيتون لمدة 50 عام من الاستثمار	
	بيتونية مسلحة	بيتونية
غير مخربة	1	2
تخريب ضعيف	2-1	4-2
تخريب متوسط	4-2	6-4
تخريب قوي	>4	>6

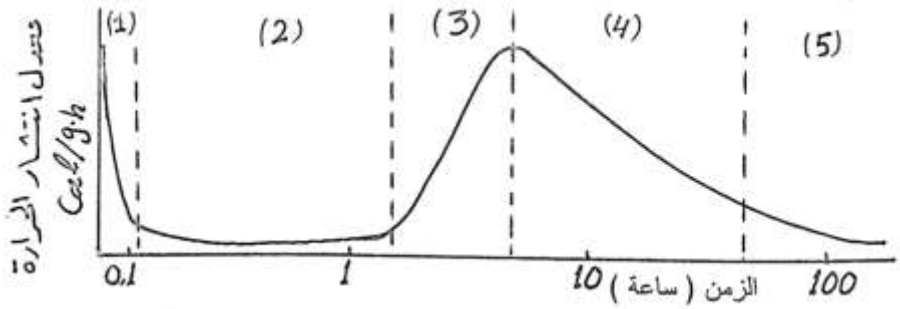
2-الإسمنت البورتلاندي[13]:

يتكون الإسمنت البورتلاندي (المقاوم للكبريتات والبورتلاندي العادي وأغلب أنواع الإسمنت بشكل عام) من مطحون الكلنكر ذي المركبات الأربعة الأساسية التالية:

C3A – C3S – C2S – C4AF

مع إضافة كبريتات الكالسيوم بكميات صغيرة إلى الكلنكر أثناء التصنيع وذلك لضبط زمن تجمد الإسمنت، بحيث لا تتجاوز النسبة المضافة من هذه المادة الـ 4% وزناً من كمية الإسمنت.

C3S: سيليكات ثلاثية الكالسيوم تعتبر من أهم مكونات الإسمنت وتشكل حوالي نصف وزنه وهي مسؤولة عن تصلبه وإعطائه المقاومة العالية في العمر الأولي والنهائي. يمكن تتبع سير تفاعل C3S مع الماء من خلال قياس معدل انتشار الحرارة مع الزمن.



الشكل (1) مراحل إماهة C3S.

يُذكر أنّ تفاعلات C3S مع الماء معقدة وتعطي نتيجة إماهتها مادتين هما سيليكات الكالسيوم المائية وماءات الكالسيوم كما في المعادلة:

$$C3S+(y+z)H \xrightarrow{\text{حرارة}} Cx.S.Hy + zCH$$

تجدر الإشارة إلى أن قيم x,y,z ليست بالضرورة أعداداً صحيحة، كما أن قينها ليست ثابتة بل تتغير تغيراً طفيفاً بمرور الزمن. لذلك يرمز عادة لسيليكات الكالسيوم المائية بالرمز العام CSH.

C2S: سيليكات ثنائية الكالسيوم يتفاعل مع الماء بشكل مشابه لتفاعل C3S إلا أنه أبطأ بكثير نظراً لقلّة فعاليته ونشاطه, ويستغرق إتمام التفاعل مع الماء إلى أكثر من سنة [13]. ويمثل تفاعله بالمعادلة التقريبية التالية:

$$2C_2S + 4H \longrightarrow C_3S_2H_3 + CH$$

حيث الأرقام الواردة في الصيغة $C_3S_2H_3$ هي أرقام تقريبية تتغير بحسب درجة الإماهة، وبنيته مماثلة لبنية

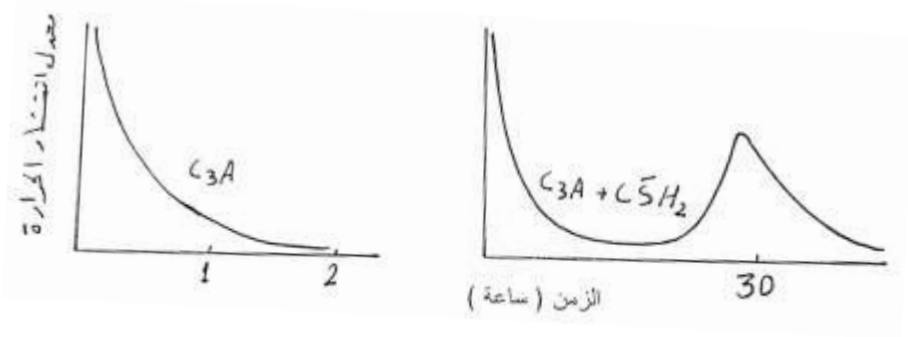
C–S–H الناتج عن إماهة C3S ،لذلك يمكن اعتباره مشاركاً في إكساب البيتون المقاومة في العمر المتوسط والمديد.

C3A : ألومينات ثلاثية الكالسيوم أسرع وأنشط مكونات الإسمنت تفاعلاً مع الماء وهو الذي يساهم في إكساب البيتون مقاومته البدائية لأنه يسبب تجمداً سريعاً للعجينة الإسمنتية، ويتم تفاعل الجزء الأكبر منه خلال نصف ساعة حسب المعادلة:

$$2C_3A + 27H \longrightarrow C_2AH_8 + C_4AHx$$

قيم x يمكن أن تأخذ (7–9–13–19).

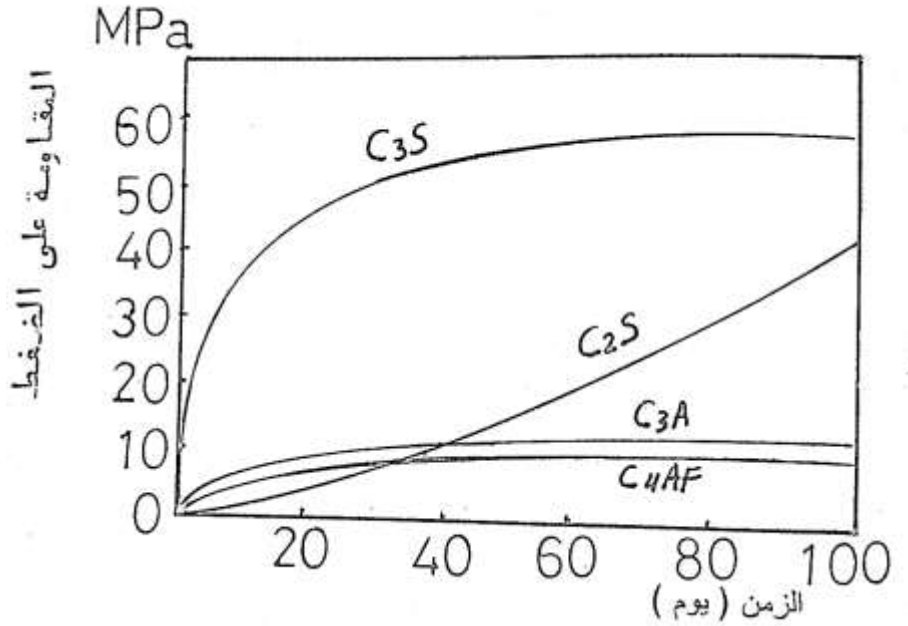
وهو (أي C3A) المركب الذي ينشر أكبر حرارة عند إماهته لذلك يُعدّ المركب الرئيسي المساعد في حصول التجمد السريع للعجينة الإسمنتية وهذا أمر غير مرغوب فيه من الناحية العملية لذلك يضاف الجبس إلى الكلينكر الناتج من الفرن ويطحن معه بنسبة تقارب 4% من وزن الإسمنت.



الشكل (2) تميه مركب C3A.

C4AF: ألومينوفريت رباعي الكالسيوم إماهته تشبه إماهة C3A لكن التفاعل أبطأ وأقل نشراً للحرارة ولا يسبب تفاعله مع الماء تجمداً سريعاً, ويعد دوره ثانوياً في عملية تصلب الإسمنت.

يُمكن ترجمة ما سبق بالمخطط البياني التالي:



الشكل (3) مقاومة نواتج تفاعل مكونات الإسمنت.

يبين الجدول التالي تغير نسب مركبات الإسمنت تبعاً لنوعه [14]:

الجدول (3) تغير نسب مركبات الإسمنت تبعاً لنوعه

نوع الإسمنت	النسبة المئوية لمركبات الكلنكر في الإسمنت			
	C4AF	C3A	C2S	C3S
إسمنت بورتلاندي	8	11	25	49
إسمنت مقاوم للكبريتات	10	4	38	42

3- التآكل الكبريتاتي:

وهو من أهم أنواع التآكل الكيميائي، وسببه وجود شوارد الكبريتات So_4^{--} في الماء الملامس للبيتون.

وتوجد هذه الشوارد في المياه الجوفية وبخاصة في التربة الغضارية، وفي مياه البحر والمناطق المجاورة لبعض الصناعات الكيميائية التي تطرح نفاياتها الغنية بشوارد الكبريتات مثل:

$$MgSo_4,\ Na2So4,\ CaSo4$$

وتتم آلية التآكل على الشكل التالي:

عند إماهة C3Aبوجود الجص يتحول في البداية إلى إيترنجيت ثم إلى مركب أحادي سلفو ألومينات $C_4A\overline{S}H_{12}$. وعندما تصادف شوارد الكبريتات شوارد الكالسيوم الموجودة في المسامات، والناتجة من تشرد ماءات الكالسيوم فإنها تتفاعل معها مشكلة كبريتات الكالسيوم المائية (الجص) حسب المعادلة:

$$Ca^{+2} + So_4^{-2} + 2H_2O \longrightarrow CaSO_4.2H_2O$$

ثم يتفاعل الناتج مع أحادي سلفو ألومينات مشكلاً الإيترنجيت من جديد:

$$C_4\overline{A}\overline{S}H_{12} + 2C\overline{S}H_2 + 16H \longrightarrow C_6\overline{A}\overline{S}_3H_{32}$$

إن حجم الإيترنجيت الناتج أكبر بكثير من حجم المواد الداخلة في التفاعل، إذ أنه يضم (30-32) جزيء ماء، وبالتالي يؤثر بقوى ضاغطة [1] تؤدي إلى حدوث إجهادات داخلية عالية وتسبب تشققات غير مرغوب بها في بنية البيتون. ولذلك فإن تخفيض نسبة C3A في الإسمنت تؤدي إلى تقليل التآكل الكبريتاتي وهو ما نجده في الإسمنت المقاوم للكبريتات.

تُتخذ عادةً سلسلة من الإجراءات الاحتياطية [14] للتقليل من أثر الكبريتات في البيتون نذكر منها:

- استخدام الإسمنت المقاوم للكبريتات في صناعة البيتون.
- استعمال مادة البوزولانا التي تتفاعل مع ماءات الكالسيوم $Ca(OH)_2$ مشكلةً سيليكات الكالسيوم المائية، وبذلك يقل تشكل كبريتات الكالسيوم المائية (الجص).
- الإقلال قدر الإمكان من النسبة W/C بحيث لا تتجاوز بأي شكل من الأشكال 0.55.
- وقاية حديد التسليح وذلك بزيادة سماكة طبقة التغطية بحيث لا تقل عن 30mm أو باستخدام طلاء خاص يُدهن به حديد التسليح أو كليهما معاً.

4- أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث إلى دراسة أسباب ظاهرة بطء تصلب البيتون الذي استُخدم فيه الإسمنت المقاوم للكبريتات والذي يؤدي إلى تأخير وصول البيتون إلى مقاومته القصوى خلافاً للبيتون الذي يُصنع باستخدام الإسمنت البورتلاندي العادي، كما يهدف إلى مراقبة تطور مقاومة نوعيّ البيتون بعد عمر 28 يوم.

5- المواد المستخدمة في إجراء البحث وطرائقه:

اعتُمد في هذا البحث المنهج التجريبي المتبع في صنع عينات المونة التقليدية من خلال صب واختبار عدد كافٍ من عينات المونة الإسمنتية ليتم بعدها جمع النتائج وتحليلها ومناقشتها للوصول إلى الاستنتاجات والتوصيات اللازمة. كما يجدر ذكره أن صب جميع العينات وكسرها والتحاليل الكيميائية لنوعيّ الإسمنت قد تم في معمل إسمنت طرطوس. أما تجارب التحليل الحبي والمكافئ الرملي قد تمت في مخبر مواد البناء في كلية الهندسة المدنية – جامعة البعث.

تجدر الإشارة هنا إلى أنّ هذا البحث تم على أنواع محددة من الإحضارات المحلية تمت دراسة خواصها لتحديد قابلية استخدامها في الخلطات المنفذة.

استخدمت المواد التالية في البحث لتحضير خلطات المونة الإسمنتية المختلفة:

1- إسمنت بورتلاندي عادي صنف 32.5 صنع معمل طرطوس مطابق للمواصفات القياسية السورية رقم 44 لعام 1980.

تم إجراء التحليل الكيميائي له وكان كالتالي:

الجدول (4) التحليل الكيميائي للإسمنت البورتلاندي العادي.

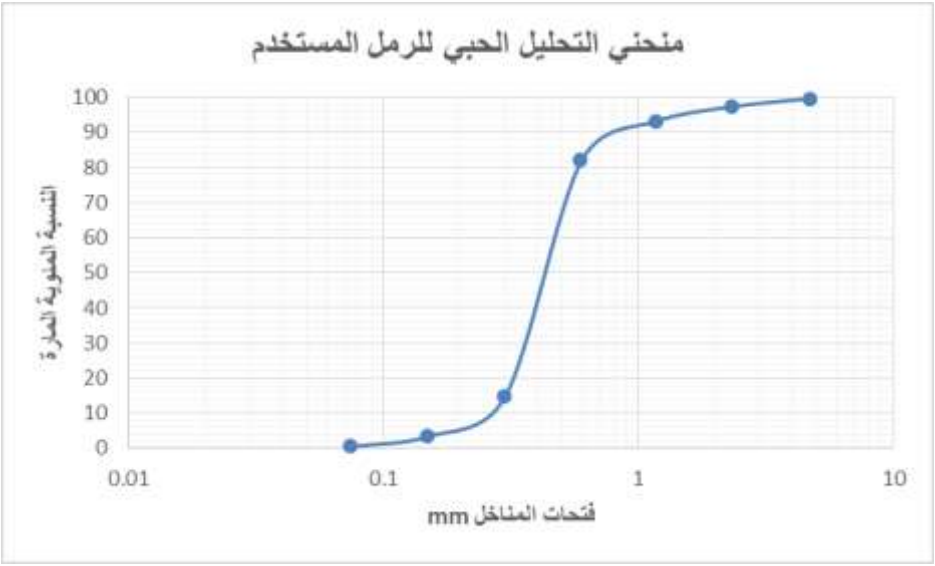
CaO	CaO free	Al2O3	Fe2O3	MgO	SiO2	SO3	LOI
61.4	0.95	4.84	4.59	2.01	18.8	2.8	3.14

2-إسمنت مقاوم للكبريتات مطابق للمواصفات القياسية السورية رقم 246 لعام 2003 صنع معمل إسمنت حماه. كما تم قياس المحتوى الكيميائي من العناصر له وكان كالتالي:

الجدول (5) التحليل الكيميائي للإسمنت المقاوم للكبريتات.

CaO	CaO free	Al2O3	Fe2O3	MgO	SiO2	SO3	LOI
61.68	1	4.71	4.39	2.82	19.8	2.1	2.7

3- حصويات ناعمة "رمل" من مقالع القريتين ذات مكافئ رملي E.s = %71.09 وهو رمل طبيعي سيليسي المنشأ جاف ونظيف حباته مدورة ملساء تحليله الحبي مبين في الشكل:



الشكل (4) منحني التحليل الحبي للرمل المستخدم.

4- الماء: الماء المستخدم في إنتاج البيتون وحفظ العينات هو الماء الصالح للشرب الخالي من الشوائب والأملاح الضارة.

6- إجراءات الصب:

رغم التقدم العلمي الكبير في مجال تكنولوجيا البيتون فإنه لا توجد طريقة ثابتة نظامية خاصة بتركيب الخلطة البيتونية وإنما جميع هذه الطرق هي طرق تجريبية تعتمد على فرضيات معينة غايتها جميعاً تشكيل بيتون سهل التنفيذ وبأقل طاقة رص ممكنة ويعطي مقاومة ميكانيكية عالية وكتيم نسبياً.

تم صب سلسلة من العينات المتشابهة (72 موشور مونة اسمنتية بشكل عينات موشورية (16*4*4)Cm) من كلا نوعيّ الإسمنت، وبظروف وخصائص صب وتخزين موّحدة، تم حفظها جميعاً في الماء ضمن أوعية بلاستيكية وكل نوع من نوعيّ الإسمنت لوحده وذلك تفادياً لأي تأثير ممكن أن يحصل على العينات (من نوعية وعاء الحفظ ومن نوعيّ الإسمنت كلٌّ على الآخر) ومن ثم كسرها عند أعمار (7-28-60-90-180) يوماً وذلك باستخدام جهازيّ الكسر (الضغط والشدّ بالانعطاف).

وقد تم تحضير عينات المونة الإسمنتية النظامية حسب NFP15-403. [12]

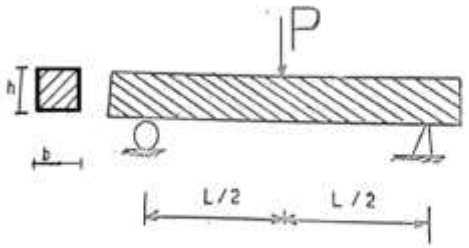
تُعرّف **المونة الإسمنتية النظامية** في النظام الفرنسي بأنها المونة التي تتركب وزناً من مثل واحد من الإسمنت مع ثلاثة أمثال من الرمل النظامي ونصف مثل من الماء بحيث تكون النسبة (W/C=0.50). يتم صبها بعد الخلط بشكل عينات موشورية أبعادها (4*4*16 cm).

تجدر الإشارة هنا إلى أنه **لم يتم** استخدام أي من أنواع الإضافات (السائلة أو الصلبة) عند إجراء هذه التجارب وذلك للوقوف فقط على تأثير اختلاف نوع الإسمنت على المقاومة وكي لا تتداخل النتائج وتتغير بإضافة متغيرات أخرى لعينات المونة الإسمنتية التي تم الحصول عليها.

6-1-تعيين المقاومة على الشد بالانعطاف:

بعد إخراج العينات من الماء ووضعها في وسط رطب برطوبة نسبية (90-100%) وبدرجة حرارة (20°C) لمدة (24h) تم كسرها بواسطة جهاز كسر المونة الإسمنتية.

يمثل الشكل التالي رسماً توضيحياً لإجراء تجربة الشد بالانعطاف على عينات المونة الإسمنتية الموشورية الأكثر في المخابر:



الشكل(5) رسم توضيحي لإجراء تجربة الشد بالانعطاف على عينات المونة الإسمنتية الموشورية.

بعد كسر العينات بالأعمار التي تم ذكرها سابقاً كانت النتائج كالتالي:

الجدول (6) النتائج الوسطية لـ 72 موشور مونة إسمنتية تم العمل عليها.

نوع الإسمنت	تغير الوزن %	المقاومة على الضغط Mpa	الشد بالانعطاف Mpa	العمر Days
إسمنت بورتلاندي عادي	0.17%	28.025	5.91	7
	0.52%	34.5	7.66	28
	0.86%	35	7.69	60
	0.86%	36.2	7.8	90
	0.86%	36.4	7.8	180
إسمنت مقاوم للكبريتات	0.18%	19.26	4.07	7
	0.18%	24.9	6.26	28
	0.18%	32	6.5	60
	0.18%	36	6.87	90
	0.18%	38.45	6.9	180

تم رسم العلاقة بين مقاومة العينات المنتجة وعمر العينات وهي القيم الوسطية للمقاومات المقاسة لأكثر من ست عينات بنفس العمر وذات ظروف التخزين وكانت النتيجة كما في الشكل التالي:

الشكل (6) تطور مقاومة عينات المونة الإسمنتية مع الزمن على الشد بالانعطاف.

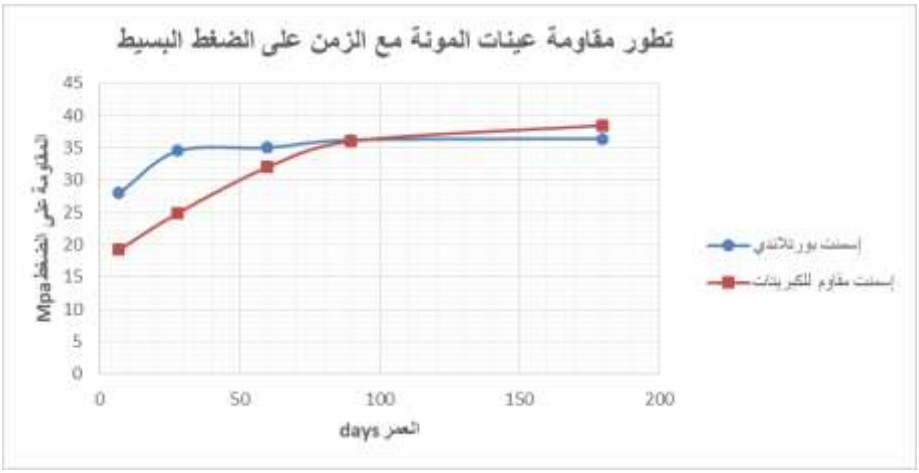
يُلاحظ من الشكل أن المقاومة على الشد بلانعطاف لكل من نوعيّ الإسمنت قد تطورت بشكل واضح وملموس بين العمرين (7–28 يوماً) وتابعت التطور إنما بشكل طفيف حتى عمر 90 يوماً لتستقر نسبياً عند عمر 100 يوماً للإسمنت المقاوم للكبريتات وعمر 28 يوم للإسمنت البورتلاندي العادي.

كما يُلاحظ أنه وفي أعمار النضج المختلفة بأن الإسمنت البورتلاندي العادي أبدى مقاومة أعلى للشد بالانعطاف على نظيره الإسمنت المقاوم للكبريتات واستمر هذا على كافة مراحل النضج حتى عمر 180 يوماً لتكون هذه الزيادة بحدود 20% في هذا العمر المتأخر. يبين الشكل التالي سطح الكسر لإحدى العينات باستخدام جهاز الشد بالانعطاف.

الشكل (7) شكل سطوح العينات بعد الكسر باستخدام جهاز الشد بالانعطاف.

6-2-تجربة تعيين المقاومة الميكانيكية على الضغط للمونة الإسمنتية النظامية:

بعد كسر العينات الموشورية على الانعطاف تم كسر أنصاف المواشير الناتجة على الضغط عند الأعمار المحددة. تم إجراء تجربة الكسر باستخدام جهاز الكسر الموجود في معمل إسمنت طرطوس، وأخذ قراءات الجهاز تم رسم العلاقة بين مقاومة العينات المُنتجة وعمر مواشير المونة الإسمنتية. يظهر المخطط التالي تطور مقاومة مواشير المونة الإسمنتية المقاسة على الضغط البسيط مع الزمن حتى العمر 180 يوماً لكل من نوعيّ الإسمنت وهي القيم الوسطية للمقاومات المقاسة لأكثر من ست عينات بنفس العمر وذات ظروف التخزين:



الشكل (8) تطور مقاومة عينات المونة الإسمنتية مع الزمن على الضغط البسيط.

من قراءة المخطط السابق نجد أن الإسمنت البورتلاندي وفي أعمار صغيرة حتى 60 يوم أبدى مقاومة أعلى على الضغط من نظيره الإسمنت المقاوم للكبريتات ولكن وبعد عمر 90 يوم كانت مقاومة الإسمنت المقاوم للكبريتات أعلى بزيادة نسبية قدرها 8% تقريباً عند عمر 180 يوم.

الشكل (9) شكل بعض سطوح العينات بعد الكسر باستخدام جهاز الكسر على الضغط.

6-3-تغير وزن العينات:

بعد فك قوالب المونة الإسمنتية تم قياس وزنها الطبيعي مباشرة قبل وضعها في الماء كما تم أخذ قراءة الوزن مرة أخرى قبل كسرها وذلك لدراسة تغير وزنها "زيادة أو نقصان" نتيجة وضعها في الماء كوسط حفظ وذلك للوقوف على نتيجة التفاعل الحاصل مع الوسط. هذا الاختبار يعطي فكرة "ولو مبدئية" عن كتامة العينات المنفذة وتشربها للماء. تجدر الإشارة إلى أن التغير الوزني لابد حاصل، لأن تفاعلات الإماهة ليست مقتصرة على مرحلة خلط الإسمنت فقط إنما هي تفاعلات مستمرة تأخذ مدة طويلة من عمر البيتون، وبالتالي التغير في الوزن يجب أخذه بعين الاعتبار لأنه ومن الضروري معرفة مقاومة العينات لوسط الحفظ بدون تطبيق أي قوى خارجية عليها. فقط وسط الحفظ.

تم رسم العلاقة بين تغير وزن مواشير المونة وعمر هذه المواشير كما يظهر في الشكل التالي:

الشكل (10) تطور تغير وزن العينات مع الزمن لكل من نوعيّ البيتون.

ومن قراءة مخطط تغير الوزن مع الزمن نلاحظ أن كتلة المواشير لكل من نوعيّ الإسمنت قد ازدادت نتيجة امتصاصها للماء، كما ويظهر أن العينات المشكلة من الإسمنت المقاوم للكبريتات أبدى مقاومة أعلى لوسط الحفظ (الماء) من خلال التغير البسيط في كتلته (لم يتجاوز 0.2%)، في حين أن العينات التي يدخل الإسمنت البورتلاندي العادي في تركيبها فقد لوحظت زيادة في الوزن من 0.18% بعمر الـ 7أيام حتى الـ 0.88% بعمر 28 يوم يُعزى إلى نواتج تفاعل الإماهة الحاصل في بنية المواشير من جهة ولامتصاص هذه المواشير بعضاً من وسط الحفظ من جهة أخرى واستمر هذا الثبات النسبي في الكتلة في الأعمار اللاحقة.

7-تحليل النتائج:

بعد قراءة النتائج وتحليلها، يمكن تفسير المقاومات المنخفضة نسبياً عند العمر 28 يوم للكثير من عينات المونة التي تحوي في تركيبها إسمنت مقاوم للكبريتات، ولكن هناك طور آخر لمنحني المقاومة لعينات البيتون التي استُخدم فيها الإسمنت المقاوم للكبريتات بين العمرين (90-180) يوم ليستقر بعدها نسبياً عند العمر 180 يوماً.

لأن سرعة تفاعل الإماهة لمكونات الإسمنت في الأيام الأولى بعد المزج هي بحسب الترتيب:

$$C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$$

وتختلف سرعة إماهة هذه المكونات حسب نعومة الإسمنت كما تتأثر بوجود شوائب فمثلاً تزداد سرعة إماهة كل من C2S،C3S بوجود شوائب من أكاسيد معدنية. وليس صحيحاً افتراض أن مكونات الإسمنت تتفاعل مع الماء بشكل مستقل عن بعضها فنجد تنافساً بين C4AF،C3A للتفاعل مع الجبس، وبما أن C3A أنشط فإنه يستهلك معظم كمية الجبس، ويكون تأثر C4AF بالجبس أقل لكنه أكثر نشاطاً مما يتوقع في تفاعله مع الماء. [13]

يُعزى تطور مقاومة الإسمنت المقاوم للكبريتات بعد عمر28 يوم إلى تركيبه المعدني (الجدول 3) حيث كنا قد أشرنا إلى أن المركب C3A هو أول المركبات التي تتفاعل مع الماء من بين المركبات الأربعة المشكلة للكلنكر، وهو الذي يعطي بدايةً مقاومة الإسمنت المقاوم للكبريتات، أما بالنسبة لكل من C3S وC2S اللذين يعطيان المقاومة للبيتون في العمر البدائي والبعيد فإن نسبتهما في تركيب الإسمنت البورتلاندي المقاوم للكبريتات أكبر منهما في الإسمنت البورتلاندي العادي مما سيؤثر في عملية التصلب التي ستتم على نحوٍ أبطأ وهذا ما يفسر استمرار ازدياد المقاومة بعد العمر 28 يوماً لعينات المونة المصنوعة من الإسمنت المقاوم للكبريتات.

يمكن أن نعزي ذلك لنفس أسباب ازدياد المقاومة التي تم دراستها في المخطط (8) وذلك لأن المركبين C3S وC2S قد تفاعلا بشكل كامل أو يُمكن القول شبه كامل [13] مما أدى لاستقرار في كتلة البيتون لكل من نوعي الإسمنت مع الزمن، على الرغم من التغيرات الوزنية السريعة التي أبدتها العينات المصبوبة من الإسمنت البورتلاندي العادي مقارنةً بنظيرتها من العينات المصنوعة من الإسمنت المقاوم للكبريتات. نظراً لتأخر الإسمنت المقاوم للكبريتات في اكتساب المقاومة فهذا يعني أن عملية الإماهة لم تكتمل واستمرت لفترة زمنية أطول من العادي وهذا انعكس على تغير في اكتساب المقاومة.

الاستنتاجات والتوصيات:

1- استخدام مادة البوزولانا أو بعض الإضافات المعدنية الأخرى (خبث الأفران) التي تتفاعل مع $Ca(OH)_2$ وتشكل مركبات جديدة ثابتة وصعبة الانحلال.

2- إضافة الكمية الدقيقة من الجبس، والتي يجب أن تتفاعل بالكامل وتشكل الإيترنجيت خلال 24-48 ساعة.

3- زيادة نسبة المركب C_4AF عن طريق زيادة نسبة أكسيد الحديد في المواد الأولية، حيث أن تفاعله مع الكبريتات يؤدي إلى تشكيل إيترنجيت هلامي لا يحدث أي زيادة في الحجم.

4- حماية البيتون من الأوساط المهاجمة عبر حماية سطحه من هذه المواد المخربة بوسائل عدة منها:

- تغطية سطح البيتون بمواد كيميائية مقاومة للأوساط المخربة.
- تغطية سطح البيتون بطبقة من البيتومين.
- تغطية سطح البيتون بصفائح بلاستيكية أو قطع سيراميكية أو أحجار الزينة.

5-إن الزيادة في المقاومة بعد عمر 28 يوماً تخص كلاً من نوعي الإسمنت، ولكن على نحو أوضح الإسمنت المقاوم للكبريتات، مما يستوجب " قبل اتخاذ القرار بقبول أو رفض " المقاومات الميكانيكية الوقوف عند التركيب المينيرالي للإسمنت وتصنيفه قبل اعتماد الزمن الأقصى الذي ستُعتمد عنده مقاومة البيتون للشد أو للضغط.

المراجع باللغة الانكليزية: References

1– Horta A., "Evaluation of Self – Consolidating Concrete for Bridge structure Applications", M. Sc. Thesis, Georgia Institute of Technology, 2005.

2 – ACI302. 1R-96, American concrete Institute, Guide for concrete floor and slab construction.

3 - ACI304. 2R-96, American concrete Institute, Placing concrete by pumping methods.

4 - ACI308. 9R-96, American concrete Institute, Standard specification for curing concrete.

5 - ACI309R -05, American concrete Institute, Guide for consolidation of concrete.

6 - ACI347 -04, American concrete Institute, guide to form work for concrete.

7 – ASTM, Standard test Method for bulk density and voids in Aggregates C29.

8- ASTM, Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory C192.

المراجع باللغة العربية:

12–حنّا، بسام. الدليل العملي لمواد البناء، منشورات جامعة البعث لعام 2000 – 1999

13 –خوري, مروان. الكيمياء للمهندسين، منشورات جامعة البعث لعام 2001 – 2000

14–خيربك، علي. مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية – سلسلة العلوم الهندسية المجلد (29) العدد (4) 2007.