المجلة الدولية للهندسة وتقنية المعلومات
journal homepage:www.ijeit.misuratau.edu.ly

دراسة مقارنة للخصائص الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية للإسمنت المتوفر في السوق الليبي

أ. أيمن ياسين سعد ياسين
جامعة عمر المختار، قسم الهندسة المدنية، البيضاء، ليبيا
aimin.yasen@omu.edu.ly

د. محمود أحمد طيب خطاب
جامعة عمر المختار، قسم الهندسة المدنية، البيضاء، ليبيا
mahmoud.khatab@omu.edu.ly

أ. أشرف أحمد محمود الفضيل
جامعة عمر المختار، قسم الهندسة المدنية، البيضاء، ليبيا
ashraf.fadiel@omu.edu.ly

الملخص— **يعتبر استهلاك الاسمنت في أي مجتمع من أهم المؤشرات الاقتصادية الدالة على مستوى تطور الدخل الوطني وبزيادة مستوى التطور والنمو العمراني يزداد استهلاك الاسمنت. الإسمنت المستخدم لأغراض البناء هو عبارة عن مادة رابطة ناعمة تمتلك خواص تماسكيه وتلاصقيه وهذه الخواص تجعله قادرا بوجود الماء على ربط قطع الركام مع بعضها البعض وتحوله إلى وحدة كاملة متراصة وصلبة. وبالتالي يمكن القول إن للأسمنت خواص هيدروليكية أي أن للأسمنت الكفاءة على التماسك والتصلب بوجود الماء نتيجة لبعض التفاعلات الكيميائية المختلفة وتكوين منتجا مقاوما للظروف الجوية والعوامل الطبيعية لذلك يعرف بالإسمنت الهيدروليكي. الهدف من هذا البحث هو دراسة الخواص الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية للأسمنت البورتلاندى (42.5N) من الرتبة (I) لعشرة انواع من الاسمنت منها المحلي والمستورد بالاعتماد على المواصفات الأمريكية (ASTM) حيث تم عمل الاختبارات الكيميائية في معامل الهندسة لمصنع اسمنت الفتائح للحصول على نتائج استباقية لجودة الأسمنت وأهمها مقاومة الانضغاط**

للأسمنت ثم تم اجراء الاختبارات الفيزيائية والميكانيكية في معامل كلية الهندسة – جامعة عمر المختار – البيضاء وكان لكل نوع من الأسمنت في كل اختبار ثلاث عينات مختبرة وتم اخذ المتوسط الحسابي بينهم وتم استبعاد القيم التي تختلف بمقدار نقصان او زيادة 15% عن متوسط ثلاث عينات مختبرة. وبعد الانتهاء من جميع الاختبارات المعملية تم استنتاج أن ثلاثة أنواع من الأسمنت البورتلاندى داخل المواصفات الأمريكية اما باقي العينات المختبرة كانت خارج المواصفة ولا يمكن استعمال هذه الأنواع من الأسمنت للخرسانة المسلحة ولا تصلح إلا لأعمال التشطيبات فقط وعليه يجب على الجهات المختصة أخذ بعين الاعتبار نوع وجودة الأسمنت المستورد وعمل جميع الاحتياطات اللازمة لضبط جودة الأسمنت وتوفيره للمستهلك وفق المواصفات المنصوص عليها.

الكلمات المفتاحية: **الإسمنت البورتلاندي، الاختبارات الفيزيائية، الاختبارات الكيميائية ، الاختبارات الميكانيكية ، الاسمنت الليبي.**

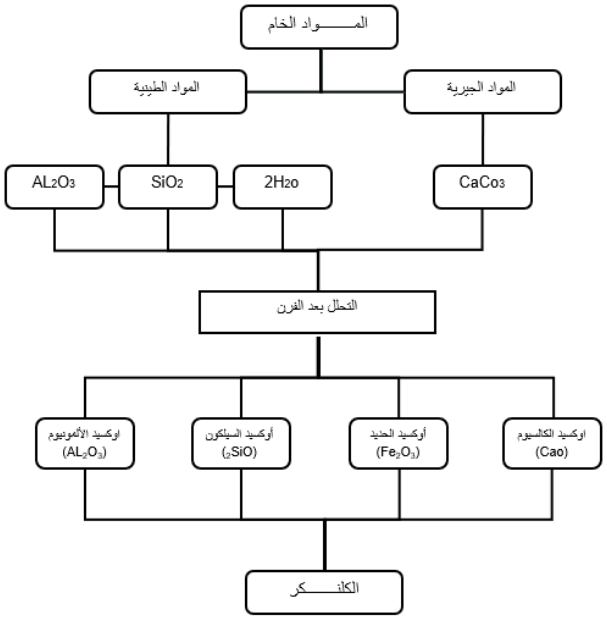
1. المقدمة

يرجع استخدام المواد الإسمنتية إلى قديم الزمان، حيث أن أصل تلك المواد هو الجير العادي والجير الهيدروليكي. في العصور القديمة كان للقدماء المصريين الدور الفعال في استخدام المواد الإسمنتية الناتجة من الجير والجبس، ثم استخدم اليونانيون والرومان الحجر الجيري المكلس وبعد ذلك تم طحن خليط من الحجر وبعض من التراب والحمم البركانية والمسمى بالبوزولان والذي وجد لأول مرة بالقرب من بلدة بوزولى في إيطاليا ومن هذا الخليط تم إنتاج الأسمنت البوزولانى، وكان لهذا الأسمنت دور فعال في تصنيع الخرسانة في منشآت عدة.بعد ذلك، شهدت القرون الوسطى تأخر وانخفاض في طرق التصنيع ومعدلات الإنتاج والاستخدام بالمقارنة بالعصور القديمة، ثم ظهرت بعد ذلك تحسينات أخرى نحو إنتاج واستخدام الأسمنت البوزولانى في القرن الثامن عشر.وتم تطويرالأسمنت بعد ذلك إلى إنتاج نوع جديد من الأسمنت وهو الأسمنت البورتلاندى والذي اكتشفه جوزيف اسبيدن البناء الانجليزي في أوائل القرن التاسع عشر عام 1825م [1, 2, 3, 4].

استلمت الورقة بالكامل في 31 اكتوبر 2021 وروجعت في 8 نوفمبر 2021
وقبلت للنشر في 5 نوفمبر 2021،

ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 14 نوفمبر 2021.

ومع التطور الصناعي الذي شهده العالم، تم تطوير الأسمنت بعد ذلك إلى إنتاج نوع جديد من الأسمنت وهو الأسمنت البورتلاندى والذي اكتشفه جوزيف اسبيدن البناء الانجليزي فى أوائل القرن التاسع عشر عام 1825م، و يرجع اسم بورتلاند إلى تشابه صلادة الأسمنت البورتلاندى مع بعض أحجار البناء الموجودة فى جزيرة بورتلاند بإنجلترا لذلك أطلق على هذا النوع من الأسمنت بالأسمنت البورتلاندى والذي ينتج من تسخين خليط من الطين الناعم جداً والحجر الجيري فى فرن حتى يتطاير ثاني أكسيد الكربون لتحصل على مادة أسمنتية لاحمة تحت الماء أو فى الهواء . ثم بعد ذلك تم إنتاج الأسمنت الحديث بواسطة إسحاق جونسون فى عام 1845م ،والذي قام بحرق خليط من الطين والجير حتى درجات حرارة عالية ليتكون الكلنكر والذي يطحن محتويا على مركبات المواد الأسمنتية القوية والتي تشابه تقريبا مركبات الأسمنت البورتلاندى فى العصور الحديثة. ويبين الشكل (1) خطوات إنتاج الكلنكر.



شكل 1. خطوات تصنيع الكلنكر

وفى العصور الحديثة توالت التحسينات في مراحل تطوير تصنيع وإنتاج أنواع الأسمنت المختلفة طبقا للأغراض المختلفة في الكثير من المجالات مثل الأسمنت فائق النعومة والأسمنت المقاوم للكبريتات والأسمنت سريع التصلد والأسمنت منخفض الحرارة والأسمنت الملون وهكذا. وتعود بداية صناعة الاسمنت في الوطن العربي إلى ثلاثينات القرن الماضي حيث تم إنشاء مصانع في كلا من تونس والعراق وسوريا .

اما صناعة الاسمنت في ليبيا بدأت الشركة الليبية للإسمنت الإنتاج سنة 1972 بمصنع واحد، بطاقة إنتاجية للإسمنت البورتلاندي بلغت 200,000 طن سنويًا وفي منطقة الجبل الأخضر تم إنشاء مصنع اسمنت الفتائح في عام 1982م، حيث بدأ هذا المصنع بالإنتاج الفعلي للاسمنت البورتلاندي العادي[1].

الاسمنت هو المادة الرابطة التي تستخدم في صناعة الخرسانة تسمى الاسمنت الهيدروليكي أو المائي لأنه يتصلب بوجود الماء. و يعتبر الاسمنت البورتلاندي من أكثر أنواع الاسمنت استعمالا. وتعتمد خواص الاسمنت على مكوناته الأساسية وهي سيليكات ثلاثي الكالسيوم (C_3S)، سيليكات ثنائي الكالسيوم (C_2S)، ألومينات ثلاثي الكالسيوم (C_3A) وألومينات حديد رباعي الكالسيوم (C_4AF). ولتحديد ما إذا كان نوع الاسمنت جيداً لاستعماله في الخلطات الخراسانية، يجب معرفة الخصائص الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية. ونظرا لعدم تغطية الناتج المحلي من الاسمنت لمتطلبات السوق المحلي فإن العديد من أنواع الاسمنت يتم استيرادها من عدة دول الأمر الذي أدى إلى وجود أنواع مختلفة من الاسمنت يتم تداولها بالسوق المحلي. ولذلك دعت الحاجة إلى دراسة خصائصها و التأكد من مطابقتها للمواصفات القياسية.

الهدف الأساسي لهذه الورقة هو دراسة الخصائص الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية للأسمنت البورتلاندي المتوفر في السوق المحلي.كما تناولت هذه الدراسة مقارنة الاسمنت المستورد مع الاسمنت المحلي مما قد يساهم في زيادة ثقة المستهلك لشراء الاسمنت المستورد او المحلي.

2. البرنامج العملي

تناول البرنامج العملي مقارنة لأنواع مختلفة من الاسمنت الموجود في السوق المحلي الليبي. حيث تم التركيز على الاسمنت البورتلاندي العادي (42.5-N) (ASTM C-150) [5]. وتم إعتماد المواصفات الأمريكية في هذه الدراسة لاجراء كافة الفحوصات والتجارب على أنواع الاسمنت المختبرة. والتجارب المستهدفة على عشرة أنواع من الاسمنت البورتلاندي المتوفر في السوق الليبي. حيث تم اخذ عينات الاسمنت المستخدم في الدراسة على مدى ثلاثة أشهر. حيث تم اخذ عينات الاسمنت الليبي من المصنع مباشرة و على فترات مختلفة و العينات المستوردة من مصر من شحنات مختلفة بمجرد اجتيازها لمعبر أمساعد البري و قبل دخولها للسوق الليبي ، أما بالنسبة للاسمنت المستورد من تركيا فقد تم اخذ العينات من شحنات مختلفة من ميناء بنغازي البحري. و التي سوف يرمز لها خلال هذه الدراسة كالأتي : (A – B – C – D – E – F – G – H – I – J) الجدول رقم (1) يوضح هذه الأنواع :

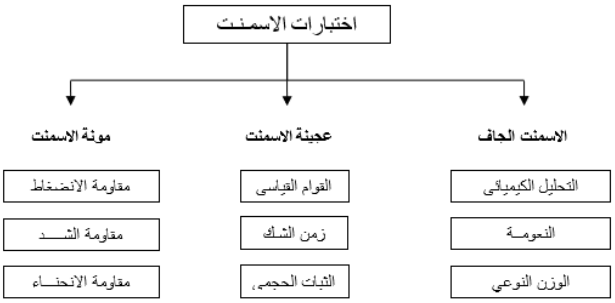
جدول 1. أنواع الاسمنت البورتلاندي المستخدم في الدراسة و رموزها

الرمز	التوصيف
A	مصنع الفتائح LCC - درنة
B	مصنع البرج للأسمنت - زليتن
C	اسمنت البرج استيراد (2020/3) - مصر
D	medcem cement – (2020/03) - تركيا
E	Göltaş Çimento - (2020/03) - تركيا
F	اسمنت الاسد - بني سويف – (2020/03) - مصر
G	اسمنت اعمار ليبيا – (2020/03) - مصر
H	اسمنت المسلح استيراد (2020/3) - مصر
I	اسمنت المسلح استيراد (2021/1) - مصر
J	اسمنت البرج استيراد (2021/1) - مصر

وسيتم إجراء الاختبارات على الاسمنت الجاف، عجينة الاسمنت ومونة الاسمنت.وعليه يتم تقييم جودة الاسمنت البورتلاندي من حيث خصائصه الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية.

تجدر الاشارة هنا إلى أن جميع الاختبارات الفيزيائية والميكانيكية لهذه البحث تم إجراؤها في معمل مواد البناء والخرسانة بقسم الهندسة المدنية – كلية الهندسة (البيضاء) – جامعة عمر المختار.اما الاختبارات الكيميائية ونعومة الاسمنت أجريت في مصنع الفتائح بمدينة درنة.

البرنامج العملي لهذه الدراسة موضحة في الشكل (2):



شكل 2. مخطط البرنامج العملي للدراسة

أ. اختبارات الاسمنت الجاف

- *الاختبارات الكيميائية:*

أجريت الفحوصات الكيميائية على عشر نماذج من الاسمنت المتوفر في السوق الليبي في المعمل الخاص بمتابعة الجودة بمصنع الفتائح (درنة)، حيث يتم تحديد نسب الأكاسيد المكونة للإسمنت بإستخدام جهازفلورية الأشعة السينية (XRF). وحسبت نسب المركبات الأساسية المكونة للإسمنت وفقا لمعادلات بوجيو. ووفقاً للمواصفات القياسية الأمريكية (ASTM C-150).تجري عادة التحاليل والاختبارات الكيميائية لمراقبة عمليات صناعة الاسمنت وذالك للتأكد من تطابق التركيبة الكيميائية للمواد الخام لمتطلبات الإنتاج مع التركيبة النهائية للكلنكر. كما ان التحاليل تجري عادة على المادة النهائية المصنعة وهي الاسمنت للتأكد من جودة الإنتاج ومطابقتها للمواصفات. شكل (3) جهازفلورية الأشعة السينية و العينات المعدة للاختبار.

شكل 3. جهاز فلورية الأشعة السينية (XRF) و العينات المعدة للاختبار.

- *نعومة الاسمنت:*

تؤثر نعومة حبيبات الأسمنت على معدل ومدى تفاعل حبيبات الأسمنت مع الماء، فبزيادة نعومة حبيبات الأسمنت تتحسن قابلية التشغيل، الترابط والتماسك بين حبيبات الأسمنت والركام، مقاومة الضغط، التحمل مع الزمن وكذلك تقلل من ظاهرة النضح.كما أن سرعة اكتمال عملية التفاعل مع الماء تعتمد على مقاس حبيبات الأسمنت حيث يصعب وصول الماء

إلى قلب الحبيبات الكبيرة مما قد يسبب تفاعل القلب الداخلي لحبيبات الأسمنت في أزمنة متأخرة وقد يصحب ذلك عدم ثبات حجم الأسمنت. تم اجراء الاختبار طبقا للمواصفة الأمريكية (ASTM C184-94).

● *الكثافة النوعية (الوزن النوعي):*

الكثافة النوعية للأسمنت هي وزن وحدة الحجوم لحبيبات الأسمنت، ويفيد تحديد كثافة الأسمنت في تصميم الخلطات الخرسانية والتحكم في جودتها. يهدف الاختبار لتحديد كثافة الأسمنت وذلك بتحديد وزن وحدة الحجوم من مادة الأسمنت باستخدام قنينة لوشاتليه للكثافة. ولكن لا تنص المواصفات على إجراء هذا الاختبار كاختبار قبول أو رفض للأسمنت، ولكن يتم تعيين الكثافة للاستفادة منها في تصميم الخلطات الخرسانية أو لأي مقارنات بين أنواع الأسمنت المختلفة. تم اجراء الاختبار طبقا للمواصفة الأمريكية (ASTM C188-95).

ب. اختبارات عجينة الاسمنت:

● *القوام القياسي:*

القوام القياسي لعجينة الاسمنت هو كمية المياه اللازمة لتشكيل عجينة ذات قوام قياسي. ويتأثر زمن شك الأسمنت ومقدار ثبات حجمه بكمية الماء الداخل في تكوين العجينة. فكلما زادت كمية المياه زاد زمن الشك للعجينة. لذلك يتم تعيين كمية المياه اللازمة لعمل عجينة قياسية من أجل إجراء اختبار زمني الشك الابتدائي والنهائي واختبار ثبات الحجم للأسمنت. تم إجراء الاختبار بناء على المواصفة الأمريكية (ASTM C187-11).

● *زمن الشك الابتدائي والنهائي:*

هو الحصول على عجينة تقل لدونتها تدريجيا مع الوقت وبعد مدة يظهر نوع التماسك يسمى هذا الوقت الشك الابتدائي وعندما تبدأ العجينة في تصلبها تكون قد وصلت الى الشك النهائي وهو مهم جدا لعملية تشغيل الخرسانة (خلطها ونقلها وصبها وهزها وتشطيبها) والعوامل التي تؤثر على زمن الشك نوع الاسمنت نعومته وكمية الماء ودرجة الحرارة ونسبة المواد المضافة وحسب المواصفات يجب إن لا يقل الشك الابتدائي عن 45 دقيقة والنهائي عن 10 ساعات. تم اجراء الاختبار بناءً على المواصفة الأمريكية (ASTM C191-13). وتكمن أهمية هذا الاختبار في أنه عند تحديد زمن الشك الابتدائي للإسمنت يمكن تحديد زمن الشك للخرسانة وبالتالي تحديد الزمن المفروض لوصول الخلطة الخرسانية من الخلاطة إلى الموقع لتتم عملية الصب ولو تم تجاوز هذا الوقت من المفترض أن يتم رفض الخرسانة لان الشك لابتدائي بدأ في الحصول. في حين أن تحديد الشك النهائي للاسمنت يساعد على معرفة الوقت الملائم لفك الشدة الخشبية او معالجة الخرسانة.

● *الثبات الحجمي:*

يقصد بثبات حجم الاسمنت عدم زيادة حجمه بعد تصلبه مما يؤدي إلى تشرخ وتفتت الاسمنت ويجرى اختبار الثبات بواسطة جهاز لوشاتليه وتنص المواصفات على إن لا يزيد التمدد عن 10 ملم. يوفر اختبار التمدد (الثبات الحجمي) للإسمنت مؤشراً للتوسع المتأخر المحتمل الناجم عن ترطيب MgO او CaO او كلا منهما عند وجودهما في الاسمنت البورتلاندي وهما سبب مهم لعدم ثبات الحجم للأسمنت.تم إجراء الاختبار طبقا للمواصفة الأمريكية (ASTM C151-00) حيث أن المواصفة نصت ($\Delta L \leq 10$ mm).

ج. إختبارات مونة الاسمنت:

● *مقاومة الانضغاط:*

توفر طريقة الاختبار هذه وسيلة لتحديد قوة الانضغاط للإسمنت الهيدروليكي ويمكن استخدام النتائج لتحديد التوافق مع المواصفات. حيث يتم الاستفادة من هذا الاختبار للتنبؤ بقوة الخرسانة، ويعتبر من أهم الاختبارات على الاسمنت. ويتم إجراء الاختبار بفحص مكعبات قياسية من مونة الاسمنت يتم خلطها يدوياً او ميكانيكياً. ويعتبر هذا الاختبار مؤشرا هاما لقبول او رفض الإسمنت البورتلاندي، ويجرى على جميع أنواع الاسمنت.

تم اجراء الأختبار بناء على المواصفة الأمريكية ASTM C109-02)حيث تم اختيار عينات بأبعاد (50×50×50) ملم وبأعمار 1، 3، 7، 28 يوم. ويتم تحديد حمل الفشل ثم يحسب مقاومة الانضغاط وذلك بقسمة حمل الانضغاط عي مساحة مقطع العينة. حيث نصت المواصفة على أن اجهاد الضغط بعد 3 أيام ≤ 12 ميجا باسكال، وبعد 7 أيام ≤ 19 ميجا باسكال وبعد 28 أيام ≤ 28 ميجا باسكال. شكل (4) يوضح جهاز مقاومة الانضغاط و القوالب المستخدمة في الفحص.

شكل 4. (أ) جهاز تعيين مقاومة الانضغاط ،(ب) القوالب المستخدمة في الفحص.

● *مقاومة الانحناء:*

تعين مقاومة المونة الإسمنتية للانحناء وذلك بتعريض كمرة من المونة لأحمال الانحناء ودراسة تأثير الحمل على الكمرة، ويتم تحديد القيم من طريقة الاختبار هذه للأغراض البحثية او المرجعية فقط ولا تستخدم لتحديد الامتثال لمتطلبات المواصفات. حيث أنه تعتبر مقاومة الشد بالانحناء من الخواص الهامة للمونة الإسمنتية، ولا يعتبر هذا الاختبار اختبار قبول أو رفض للأسمنت. شكل (5) يوضح جهاز الفحص المستخدم في تعيين مقاومة الانحناء و القوالب المستخدمة.

شكل 5. (أ) جهاز تعيين مقاومة الانحنـــــاء ،(ب) القوالب المستخدمة في الفحص.

تـم إجـراء الاختبـار بنـاء علـى المواصـفة الأمريكيـة (ASTM C348).حيث تم اختيار عينات بأبعاد (40×40×160) ملم وبأعمار 3، 7 ايام. . ويتم تحديد حمل الفشل ثم يتم حساب مقاومة الانحناء من المعادلة (1).

$$F_m = \frac{My}{I} \qquad (1)$$

حيث : F_mهي مقاومة الانحناء (MPa)، M هو عزم الانحناء المؤثر على الكمرة $(N.mm)$، yوهو محور تعادل القطاع (mm)، Iهو عزم القصور الذاتي لقطاع الكمرة (mm^4).

● *مقاومة الشد:*

أدرك الباحثون في مجال الاسمنت الهيدروليكي الحاجة إلي تحسين مقاومة الشد حتى تساعد اقتصادياً في تقليل نسبة حديد التسليح في الخرسانه. هذا الاختبار اختياري نظراً لأن مقاومة الشد للأسمنت حوالي(10 – 15 %) من مقاومة الضغط وكذلك نظراً لما يصاحب هذا الاختبار من تشتت كبير في النتائج ولا يعتبر هذا الاختبار اختبار قبول أو رفض للأسمنت. تم إجراء هذا الاختبار حسب المواصفة الأمريكية (ASTM C496). شكل (6) يوضح جهاز تعيين مقاومة الشد و القوالب المستخدمة في الفحص. ويتم حساب مقاومة الشد لعينة الاسمنت من المعادلة (2).

$$F_m = \frac{P}{A} \qquad (2)$$

حيث: Fm هي مقاومة الشد لعينة الاسمنت (MPa)، P هو الحمل الأقصى المؤثر (N)، A هي مساحة مقطع العينة (mm2)

شكل 6. جهاز تعيين مقاومة الشـد و القوالب المستخدمة في الفحص.

3. النتائج

أ. اختبارات الاسمنت الجاف:

- *الاختبارات الكيميائية:*

1. المركبات الكيميائية الثانوية:

من خلال فحص العينات في جهاز فلورية الأشعة السينية تم تحديد كمية المركبات الكيميائية الرئيسية والثانوية الموجودة في العينات المختلفة حيث يوضح جدول (2) نسب المركبات الرئيسية والثانوية الداخلة في تركيب الاسمنت. هذه المركبات لها تأثيرات مختلفة على خواص الاسمنت كل على حسب نسب تواجده. فعلى سبيل المثال مركب أكسيد الماغنيسيوم (MgO) تراوحت نسبة تواجده في أنواع الاسمنت التي تم اختبارها في هذا البحث بين (1.74– 3.03) % حيث احتوي النوع I علي اقل نسبة بينما احتوي النوع E علي اعلي نسبة ضمن العينات المختبرة. هذا المركب يكون مصدره الرئيسي هو حجر الكلس الداخل في تصنيع الاسمنت. ضرر وجود (MgO) بنسبة عالية في الاسمنت يعود الى تفاعله مع الماء مكون هيدروكسيد الماغنسيوم وهذا التفاعل يكون مصحوب بزيادة حجمية تؤثر سلباً علي الاسمنت حيث تسبب هذه الزيادة إجهادات عالية داخل عجينة الاسمنت تؤدي إلي تشققات وتلف الخرسانة. بالمثل فإن مركب أكسيد الكالسيوم الطليق (CaO) والذي تراوحت نسب تواجده بين (55.56 – 64.69) % حيث احتوي النوع E علي اقل نسبة بينما احتوي النوع F علي اعلي نسبة ضمن العينات المختبرة. هذا المركب يكون موجود في الكلنكر متحدا مع أكاسيد أخري ووجوده غير مرغوب فيه لأنه بإضافة الماء يتحول إلى $Ca(OH)_2$ ويكون هذا التحول مصحوب بزيادة حجمية أيضا.من ناحية أخرى فإن الزيادة الحجمية عند تفاعل الاسمنت مع الماء قد يكون سببها تواجد الأكاسيد القلوية وهي أكسيد البوتاسيوم (K_2O) وأكسيد الصوديوم (Na_2O) والتي بينت نتائج فحص أنواع الاسمنت المختبرة في هذا البحث أن نسب تواجدها كانت مابين (0.22 – 1.07) % بالنسبة لمركب K_2O و (0.04 – 0.25) % لمركب Na_2O. حيث أن بإمكان هذه القلويات التفاعل مع بعض أجزاء السليكا الفعالة الموجودة في الركام ضمن الخرسانة المتصلبة ونواتج التفاعل تكون مصحوبة بزيادة في الحجم فيتسبب في تشقق وتلف الخرسانة ويسمى هذا التفاعل بالتفاعل القلوي للركام ومن الممكن تقليل هذا التفاعل باستعمال الاسمنت الحاوي على نسبة قليلة من القلويات لا تزيد عن (0.6%) أو بإضافة مواد من السليكا المسحوقة سحقا ناعما لتتفاعل مع القلويات قبل تصلب الخرسانة وإضافة إلى ذلك فان احتواء الاسمنت على نسبة عالية من القلويات يؤثر على الوقت اللازم لتجمد الاسمنت. وهكذا بالنسبة لباقي المركبات الثانوية للأسمنت فكل له تأثيرات مختلفة على خواص الاسمنت والتي لا يمكن حصرها في هذا السياق.

جدول 2. نسب المركبات الكيميائية الثانوية لأنواع الاسمنت المختلفة

J	I	H	G	F	E	D	C	B	A	نوع الاسمنت / التركيب الكيميائي
21.74	19.02	19.62	21.85	20.39	25.89	17.66	20.7	20.91	20.29	SiO_2
4.89	4.15	4.81	4.82	4.85	5.72	4.7	5.23	5.16	5.65	Al_2O_3
6.34	4.42	3.82	6.75	3.7	3.49	3.32	8.1	3.24	3.3	Fe_2O_3
56.53	61.76	63.26	57.03	64.69	55.56	64.18	58.19	63.7	63.56	CaO
3.03	2.55	2.42	2.97	1.84	1.85	1.74	2.67	2.18	2.06	MgO
3.72	3.12	3.57	3.02	2.66	2.02	2.9	2.74	2.83	2.7	SO_3
0.19	0.21	0.04	0.18	0.23	0.2	0.25	0.19	0.23	0.19	Na_2O
0.22	0.44	0.25	0.19	0.15	1.07	0.5	0.22	0.73	0.85	K_2O
0.012	0.015	0.025	0.012	0.013	0.007	0.009	0.02	0.009	0.007	Cl
0.55	0.22	0.44	0.56	0.45	0.32	0.46	0.59	0.32	0.34	TiO_2
0.231	0.204	0.123	0.209	0.064	0.078	0.038	0.381	0.04	0.043	MnO
0.09	0.06	0.12	0.09	0.19	0.02	0.13	0.06	0.17	0.16	P_2O_5

2. معاملات الربط بين الاكاسيد الموجودة في الاسمنت :

تسمى عوامل الربط بين الأكاسيد الموجودة في مكونات الأسمنت بالمعاملات. وتشمل هذه المعاملات معامل الألومينا ومعامل السيليكا ومعامل الإشباع الجيري والمعامل الهيدروليكي.

1- معامل الامونيا AM : تتراوح قيمة هذا المعامل بين (1.5 – 1.8) .طبقا للمواصفة القياسية الأمريكية (ASTM:C150)

2- معامل الاشباع الجيري L.S.F : طبق للمواصفات الأمريكية (ASTM C150) فإن قيمة هذا المعامل تتراوح بين (0.66 – 1.02) .

3- المعامل الهيدروليكي HM : لم تحدد المواصفات الأمريكية (ASTM C150) حدود هذا المعامل، تتراوح قيمة هذا المعامل بين (2.42– 1.543).

4- نسبة السيليكا SM : تتراوح قيمة هذا المعامل بين (2.4 – 2.6) وذلك طبقا للمواصفات الأمريكية (ASTM C150)

الجدول (3) يوضح قيم معاملات الربط بين الاكاسيد لأنواع الاسمنت المختبرة.

جدول 3. النسب المئوية لنتائج معاملات الربط لأنواع الأسمنت المستخدمة في الدراسة

نوع الاسمنت / التركيب الكيميائي	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
L.S. F	0.938	0.923	0.81	1.086	0.663	0.962	0.77	0.962	0.975	0.761
H.M	2.109	2.106	1.654	2.42	1.543	2.171	1.643	2.151	2.159	1.636
S.M	2.267	2.489	1.553	2.202	2.811	2.385	1.889	2.273	2.219	1.936
A.M	1.712	1.593	0.646	1.416	1.639	1.311	0.714	1.259	0.939	0.771

3. المركبات الكيميائية الرئيسية:

يتألف مسحوق الاسمنت الناتج من خلط خاماته الرئيسية من أربعة مركبات كيميائية، ألومينات ثلاثي الكالسيوم (C_3A)، ألومينات حديد رباعي الكالسيوم (C_4AF)، سيليكات ثنائي الكالسيوم (C_2S) وسيليكات ثلاثي الكالسيوم (C_3S). ويبين الجدول (4) نتائج ونسب تواجد هذه المركبات في أنواع الاسمنت التي تم اختبارها ومقارنة هذه النتائج مع حدود المواصفات الأمريكية (ASTM C150). من الجدول يمكن ملاحظة أن أربعة أنواع فقط من الاسمنت المختبر جاءت نتائجها ضمن حدود المواصفة بالنسبة للمركبات الرئيسية الأربعة وهذه الأنواع هي(A, B,F, I).

جدول 4. نسب المركبات الكيميائية الرئيسية لأنواع الاسمنت المختلفة

نوع الاسمنت / التركيب الكيميائي / حدود المواصفة	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
C3S	54.17	53.03	25.03	82.46	19.75	62.92	15.46	60.46	63.77	12.38
C2S	17.30	19.93	40.45	11.58	89.13	10.98	50.97	10.63	6.41	52.98
C3A	9.38	8.19	0.15	6.83	9.25	6.59	1.35	6.28	3.51	2.23
C4AF	10.04	9.85	24.64	10.10	10.62	11.25	20.54	11.62	13.45	19.29
(65-45)										
(30-10)										
(12-5)										
(12-6)										

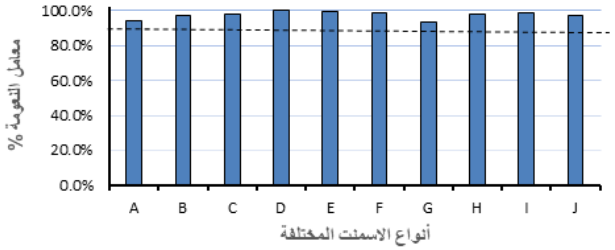
وكما هو معروف فإن لهذه المركبات تأثيرات مهمة ومتفاوته على خواص الاسمنت. فالمركب C_3S هو المسؤول عن المقاومة المبكرة للأسمنت ويؤثر ايضا علي تطور المقاومة مع الزمن ويساهم بشكل كبير في الحصول على قاعدية عالية للأسمنت والتي تكون سببا في عدم صدأ حديد التسليح. من ناحية أخرى فإن المركب C_2S هو المسؤول عن المقاومة النهائية للأسمنت حيث أنه يتفاعل ببطء مع الماء وتزداد سرعة تفاعله بعد 28 يوم. على الطرف الآخر، فإن مركب C_3A سريع التفاعل مع الماء ويضاف الجبس لتقليل سرعة تفاعله مع الماء، وهو مسؤول عن التصلب الابتدائي للأسمنت، فعند إضافة الماء إلي الاسمنت يتفاعل مع (C_3A) ويبدأ بالتصلب بسرعة، وعندها يتدخل الجبس ليمنع عملية الشك السريع. وبشكل مشابه فإن مركب C_4AF أيضا سريع التفاعل مع الماء ولكن أبطء من (C_3A)، ويؤثر على تجمد الأسمنت وهو سبب أعطاء اللون الرمادي الغامق للأسمنت. الجدير بالذكر هنا ، انه من المهم الحد من محتوى C_3A و بالخاصة في الخرسانة التي سوف تكون معرضه للهجوم الكبريتات. حيث إن هذا المركب يتفاعل مع الجبس الموجود في الاسمنت و ينتج الاترينجيت و الذي يتحول لاحقا إلى أحادي الكبريتات ، هذا المركب عند تعرضه للكبريتات الموجودة في البيئة فإنه يصبح غير مستقر و يتفاعل مره أخرى مع الاترينجيت و الذي يسبب تمدد الخرسانة و يؤدي لاحقا إلى تدهورها. ونتيجة للتأثير الكبير والمهم على خواص الاسمنت المختلفة، حددت المواصفة نسب تواجد هذه المركبات في الاسمنت لتتم الموازنة بين القوة وزمن التصلب الابتدائي والنهائي.

- *نعومة الاسمنت:*

نعومة الاسمنت هي من الخواص المهمة التي تؤثر على سرعة واكتمال تفاعله مع الماء.فبزيادة نعومة حبيبات الأسمنت تزداد المساحة السطحية النوعية له مما يوفر مساحة أكبر لالتقاء وتفاعل الماء مع وزن محدد من الأسمنت، كما أن سرعة اكتمال عملية التفاعل مع الماء تعتمد على مقاس حبيبات الأسمنت حيث يصعب وصول الماء إلى قلب الحبيبات الكبيرة مما قد يسبب تفاعل القلب الداخلي لحبيبات الأسمنت في أزمنة متأخرة وقد يصحب ذلك عدم ثبات حجم الأسمنت. كما أنه أيضاً قد يسبب كبر حجم الحبيبات عدم تفاعل قلبها تماماً مما يؤدى إلى ضعف في المقاومة لنفس محتوى الأسمنت. وتبعا لهذا التأثير المهم، فقد حددت المواصفات الأمريكية (ASTM C-150) أن معامل النعومة للأسمنت يجب ألا يقل عن 90% لكي يتم تفادي التأثيرات السلبية المذكورة سلفا. ويوضح الشكل (7) قيم معامل النعومة لأنواع الاسمنت التي تم اختبارها. ومن الواضح أن معامل النعومة لجميع هذه الأنواع ضمن حدود المواصفة.

- *الكثافة النوعية (الوزن النوعي):*

يتم تعيين الكثافة للاستفادة منها فى تصميم الخلطات الخرسانية أو لأي مقارنات بين أنواع الأسمنت المختلفة. ولم تضع المواصفات الأمريكية (ASTM)حدودا للوزن النوعي. ولكن ومن واقع تجارب سابقة فإن قيم الوزن النوعي للأسمنت تتراوح ما بين (3.1 – 6.3) والجدول (5) يوضح قيم الوزن النوعي لأنواع الاسمنت المختبرة في هذا البحث. حيث تتراوح قيم الوزن النوعي للعينات المختبرة ما بين (2.978 – 352.3).



شكل 7. قيم معامل النعومة لأنواع الاسمنت المستخدم في الدراسة

جدول 5. قيم الوزن النوعي لأنواع الاسمنت المختلفة

العينة	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
الوزن النوعي	3.218	3.251	3.352	2.978	3.078	3.250	3.318	3.335	3.318	3.218

ب. اختبارات عجينة الاسمنت:

- *القوام القياسي:*

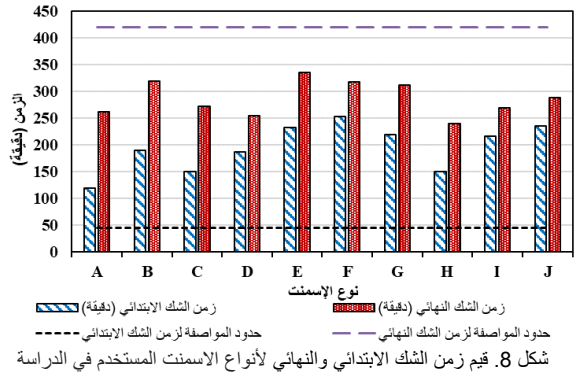
النسبة المئوية للماء المستعمل في خلط العجينة الإسمنتية يؤثر بدرجة كبيرة على زمن الشك فالعجينة ذات النسبة العالية من الماء تشك أبطأ من العجينة الجافة نسبيا ولذلك تحدد نسبة الماء لعمل العجينة ذات القوام القياسي من اختبار تحديد نسبة الماء اللازمة للعجينة الإسمنتية ذات القوام القياسي باستخدام جهاز فيكات وذلك قبل اختبار تحديد زمني الشك الابتدائي والنهائي للعجينة الإسمنتية باستخدام جهاز فيكات أيضاً وكذلك أيضاً قبل اختبار تقدير ثبات الحجم (التمدد) للأسمنت بطريقة لوشاتليه. وحددت المواصفات الامريكية (ASTM C150) مقدار الغرس لإبرة القوام القياسي تكون في حدود (1±10) مم من سطح العينة والجدول (6) يوضح قيم القوام القياسي للأنواع المختلفة من الاسمنت. حيث تتراوح قيم القوام القياسي للعينات المختبرة (23 – 28) %.

جدول 6. قيم القوام القياسي لأنواع الاسمنت المختلفة

العينة	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
القوام القياسي%	25	25.5	24	24.5	26	24.5	23	28	26	24

- *زمن الشك الابتدائي والنهائي:*

تحدد المواصفات الأمريكية (ASTM C150) زمن الشك الابتدائي للإسمنت بأن لا يقل عن 45 دقيقة وهو عند وصول ابرة الشك الي مسافة 25مم من سطح العينة. أما زمن الشك النهائي فيجب أن يكون أقل من 375 دقيقة وهو الوقت عند نفاذ الإبرة بينما لا تترك فيه الحلقة المتصلة بالإبرة أثراً فى الأسمنت. الشكل (8) يوضح قيم زمن الشك للأنواع المختلفة من الاسمنت. حيث تتراوح قيم زمن الشك الابتدائي مابين (120 – 253) دقيقة، بينما تتراوح قيم زمن الشك النهائي مابين (240 – 336) دقيقة.



شكل 8. قيم زمن الشك الابتدائي والنهائي لأنواع الاسمنت المستخدم في الدراسة

● *الثبات الحجمي:*

تحدد المواصفات الأمريكية (ASTM C150) الحد الأقصى لمقدار التغير في طول عينة الاسمنت المختبرة بـ 10 مم (ΔL≤10 mm) والجدول (7) يوضح نتائج اختبار الثبات للعينات المختلفة. حيث تتراوح قيم التغير في الطول للعينات المختبرة مابين (0.667 – 833.1) ملم وكانت النتائج ضمن حدود المواصفة لجميع العينات المختبرة.

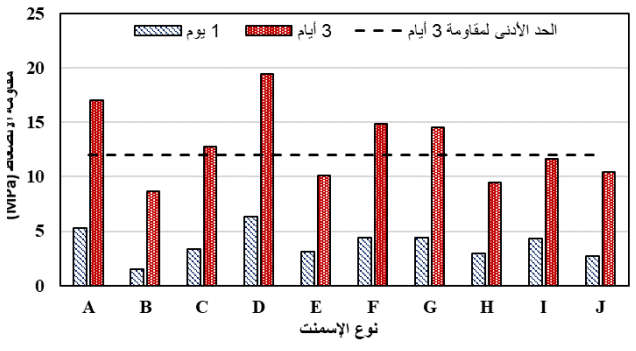
جدول 7. نتائج اختبار الثبات لأنواع الاسمنت المختلفة

العينة	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
ΔL (mm)	0.667	0.833	1	1	0.933	1	1.5	1.833	1.167	1.333

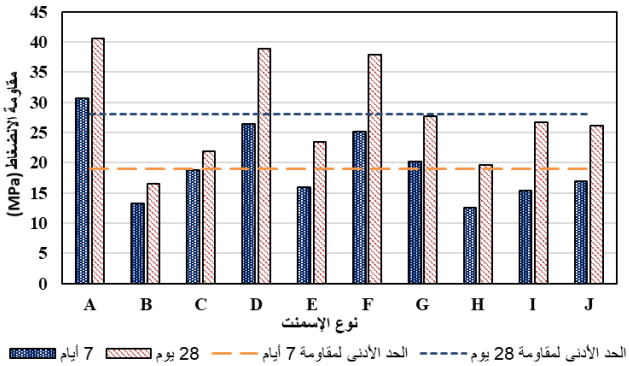
ج. إختبارات مونة الاسمنت:

● *مقاومة الانضغاط:*

تعين مقاومة الانضغاط* في المونة الإسمنتية إلي تعتبر أهم خصائص الاسمنت، والتي يتم من خلالها المقارنة بين أنواع الاسمنت المختلفة لتحديد مدي جودتها ومطابقتها للمواصفات.والاشكال (9) و (10) توضح قيم مقاومة الانضغاط للأنواع المختلفة من الاسمنت باعمار من يوم واحد الى 28 يوم. حيث تتراوحت قيم مقاومة الانضغاط مابين (1.493 – 6.333 MPa) لعمر يوم واحد و (8.667 – 19.453 MPa) لعمر ثلاثة ايام و (12.506 – 30.693 MPa) لعمر 7 أيام و (16.547 – 40.5 MPa) لعمر 28 يوم. كما توضح الأشكال حدود المواصفة (ASTM C109-02) لقيم مقاومة الانضغاط. ومن هذه الاشكال يتبين بشكل واضح فشل خمسة من أنواع الاسمنت المختبرة (B, E, H, I, J) في الوصول إلى الأدنى لمقاومة الانضغاط بعمر 3 أيام بينما حقق الاسمنت نوع D أعلى مقاومة انضغاط بين الأنواع العشرة (19.5 MPa). وهذه الأنواع هي نفسها فشلت في الوصول إلى الحد الأدنى لمقاومة الانضغاط لعمر 7 أيام. أما بالنسبة لعمر 28 يوم فقد أوضحت النتائج أن ثلاثة أنواع فقط من الانواع المختبرة نجحت في اجتياز الحد الادنى لمقاومة الانضغاط وهذه الانواع هي A و D و F. وحقق النوع A أعلى مقاومة انضغاط بعمر 28 يوم (40.5 MPa).

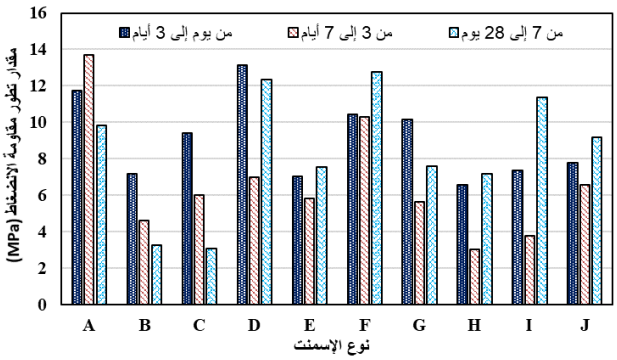


شكل 9. مقاومة الانضغاط لعمر يوم واحد و ثلاثة أيام لأنواع الاسمنت المستخدم في الدراسة



شكل 10. مقاومة الانضغاط لعمر 7 أيام و 28 يوم لأنواع الاسمنت المستخدم في الدراسة

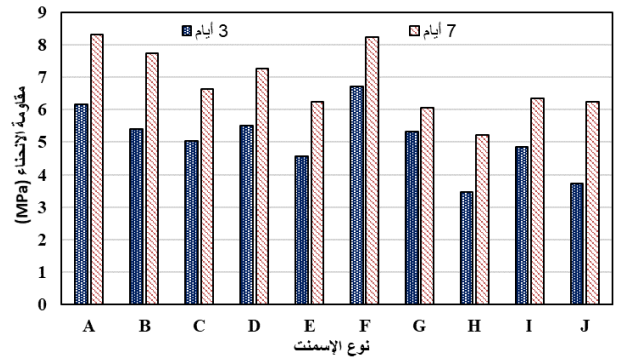
ومن الجدير بالذكر أن النوع A حقق أسرع تطور في مقاومة الانضغاط مع الزمن، حيث تطورت مقاومته للانضغاط بمقدار 12 ميجاباسكال بين عمر يوم واحد و عمر 3 أيام، وبمقدار 13 ميجا باسكال بين 3 و 7 أيام، وأخيرا بمقدار 10 ميجاباسكال بين 7 أيام و 28 يوم. ويبين الشكل (11) مقدار تطور مقاومة الانضغاط مع الزمن لأنواع الاسمنت المختبرة في هذه الدراسة.



شكل 11. مقدار تطور مقاومة الانضغاط مع الزمن لأنواع الاسمنت المستخدم في الدراسة

● *مقاومة الانحناء:*

لم تحدد المواصفات الأمريكية (ASTM C150) قيما لمقاومة الانحناء لعينات المونة الإسمنتية. الشكل (12) يوضح قيم إجهاد الانحناء للأنواع المختلفة من الاسمنت. حيث تتراوح قيم مقاومة الانحناء مابين (3.453 – 6.72 MPa) لعمر ثلاثة أيام و (5.227– 8.307 MPa) لعمر 7 أيام. ومن الجدير بالملاحظة أن تطور مقاومة الانحناء لجميع عينات الاسمنت المختبرة كان متقاربا. وسجل النوعين A و F أعلى قيمة لمقاومة الانحناء (8.3 MPa).

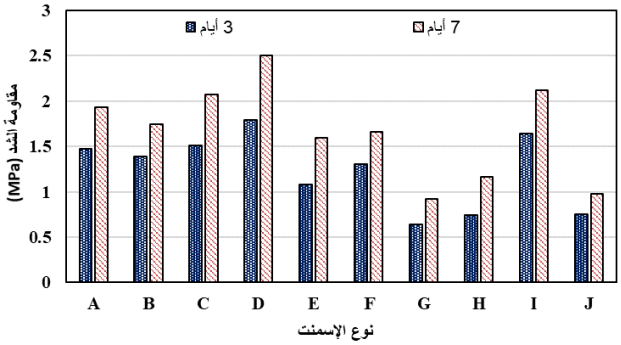


شكل 12. مقاومة الانحناء لعمر 3 أيام و 7 أيام لأنواع الاسمنت المختلفة

● *مقاومة الشد:*

لم تحدد المواصفات الأمريكية (ASTM C150) قيما لمقاومة الشد لعينات المونة الإسمنتية. الشكل (13) يوضح قيم إجهاد الشد للأنواع المختلفة من الاسمنت التي تم اختبارها في هذا البحث. حيث تتراوح قيم

مقاومة الشد مابين (0.641 – 1.792 MPa) لعمر ثلاثة أيام و (0.92 – 2.504 MPa) لعمر 7 أيام.



شكل 13. مقاومة الشد لعمر 3 أيام و 7 أيام لأنواع الاسمنت المختلفة

4. الخلاصة

نظرا لأهمية الإسمنت في صناعة الخرسانة في ليبيا والطلب المتزايد على استهلاكه، وكذلك لكثرة الأنواع التي يتم استيرادها في السنوات الأخيرة، فقد تم إجراء هذه الدراسة على عدد عشرة أنواع من الاسمنت المتوفر في السوق المحلي، منها ماهو مستورد ومنها ما يصنع محليا. وكانت هذه الدراسة تهدف إلى المقارنة بين هذه الانواع والتأكد من مدى جودتها ومطابقتها للمواصفات. وبالتالي زيادة وعي المواطن وإرشاده إلى اختيار نوع الاسمنت الذي يضمن له جودة الخرسانة المصنعة. ومن نتائج التجارب المعملية التي تم إجرائها على عشرة أنواع من الاسمنت المتوفر في السوق المحلي الليبي البحث و بعد مناقشة هذة النتائج يمكن أن نستنتج التالي:

اولا : الخواص الكيميائية:

- إن ارتفاع القلويات في الأنواع A, B, E عن الحدود يؤدي إلي زيادة في حجم الخرسانة وحدوث تشققات مع الزمن وتلف الخرسانة. إن ارتفاع اوكسيد الحديد في كلا من الأنواع C،G J، عن الحدود يعطي الاسمنت اللون الرمادي الغامق ويزيد من C_4AF على حساب C_3A مما يؤثر في نقصان قوة الاسمنت وتلف الخرسانة حيث يؤثر C_4AF علي تجمد الاسمنت. ان انخفاض ثنائي اوكسيد السليكون في كلا من الأنواع D، H، I عن الحدود يؤثر على زيادة C_3S على حساب C_2S ودخوله في الحدود الحرجة فيؤثر على مقاومة الاسمنت.
- حقق النوع D أعلى مقاومة مبكرة وبالرجوع إلى التحليل الكيميائي تبين أنه يحتوي على أعلى نسبة من C_3S وهو المركب المسؤول عن ارتفاع المقاومة في الاعمار المبكرة.
- انخفاض اوكسيد الكالسيوم في كلا من الأنواع C،E G، J، عن الحدود مما يؤثر علي فقدان القوة للخرسانة.
- ارتفاع ثالث اوكسيد الكبريت في كلا من الأنواع G،H I، J، عن الحدود، حيث سجلت هذه الانواع أعلى قيم تمدد حسب إختبار لوشانتليه مما يؤثر علي زمن الشك وعدم ثبات الاسمنت والذي يؤدي إلي احتمال حدوث تشققات في الخرسانة وفقدان القوة للأسمنت.
- النوع H سجل أكبر قيمة تمدد حسب اختبار لوشانتليه والسبب يمكن أن يعود لإحتوائه على أعلى نسبة من ثالث أكسيد الكبريت (SO_3) ومن المعلوم أن وجود هذا المركب وتفاعله مع C_3A يكون مصحوبا بزيادة حجمية.
- ارتفاع معامل الإشباع الجيري للاسمنت D (1.086) يدل على إن هذا النوع يتكون من سيليكات ثلاثي الكالسيوم فقط و هذا يتوافق مع نتائج التحليل الكيميائي و التي أظهرت احتواء هذا النوع على 82.46 % من مركب C_3S فقط . ارتفاع معامل الاشباع الجيري في الاسمنت عن الحدود المسموح بها يؤثر على تكوين الكلنكر المبكر للأسمنت وبالتالي عدم الحصول علي خصائص الاسمنت المطابقة للمواصفات.
- انخفاض معامل السليكا في كلا من الأنواع A،C D، F، G، H، I، J ، وارتفاعه في النوع E عن الحدود مما يؤثر على تفاعلات الاسمنت وعند انخفاضه يكون اسمنت سريع التفاعل مما يؤثر علي زمن الشك للأسمنت.
- ان انخفاض معامل الألومينا في كلا من الانواع C ،G ،J يؤثر على الطور السائل في الكلنكر المحروق ,والذي أظهر تأثيرا واضحا على مقاومة الاسمنت.
- انخفاض سيليكات ثلاثي الكالسيوم في كلا من الانواع C،E ،G ،J وارتفاع النوع D عن الحدود مما يؤثر على مقاومة الاسمنت الابتدائية.
- انخفاض سيليكات ثنائي الكالسيوم في كلا من الانواع D،I وارتفاع كلا من الانواع C،E ،G ،J عن الحدود مما يؤثر على مقاومة الاسمنت النهائية.
- إن انخفاض ألومينات ثلاثي الكالسيوم (C_3A) في كلا من الأنواع C، G، I، Jعن 5 % ، يساعد على زيادة مقاومة الكبريتات لهذه الأنواع. حيث إنه وفقا للمواصفة ASTM 150 تصنف الانواع التي تقل فيها نسبة C_3A عن 5% بأنها عالية المقاومة للكبريتات.
- ارتفاع ألومينات حديد رباعي الكالسيوم في كلا من الانواع C ،G ، J،I عن الحدود مما يؤثر على تجمد الاسمنت ويؤثر على عملية الشك للأسمنت وإعطاء الاسمنت اللون الرمادي الغامق.
- اكاسيد الألمنيوم و المغنيسيوم لجميع أنواع الأسمنت كانت ضمن الحدود القياسية.

ثانيا : الخواص الفيزيائية:

ان خواص الأسمنت الفيزيائية كالنعومة والثبات وزمن الشك والوزن النوعي لجميع أنواع الأسمنت كانت ضمن الحدود القياسية.

ثالثا: الخواص الميكانيكية :

إن نتائج مقاومة الانضغاط لعمر ثلاثة أيام في كل من الأنواع A, C, D, F, G, كانت ضمن الحدود القياسية وان الأنواع B, E, H, I, J لم تكن ضمن الحدود القياسية. بينما كانت نتائج مقاومة الانضغاط لعمر 7 ايام في كل من الأنواع A, D, F, G, كانت ضمن الحدود القياسية وفشلت بقية الانواع المختبرة في الوصول الى الحد الادنى من المقاومة حسب المواصفة.

ومن ناحية أخرى، فإن نتائج مقاومة الانضغاط لعمر 28 يوم لكل من الأنواع A, D, F, كانت ضمن الحدود القياسية وان الأنواع B, C, E, G, H, I, J لم تكن ضمن الحدود القياسية. ومن الجدير بالذكر أن الاسمنت نوع A حقق أسرع تطور في مقاومة الانضغاط مع الزمن، حيث تطورت مقاومته للانضغاط بمقدار 12 ميجاباسكال بين عمر يوم واحد و عمر 3 أيام، وبمقدار 13 ميجا باسكال بين 3 و 7 أيام، وأخيرا بمقدار 10 ميجاباسكال بين 7 أيام و 28 يوم.

من خلال النتائج سابقة الذكر تؤكد هذه الدراسة على ضرورة التأكد من مطابقة الاسمنت المستورد للمواصفات القياسية و ذلك من خلال تفعيل دور مكاتب ضبط الجودة في جميع الموانئ البحرية و المنافذ البرية و التاكيد على ضرورة إجراء الاختبارات على الاسمنت المورد و التاكيد على مطابقته للمواصفات الليبية.

الشكر والتقدير

يتقدم الباحثون بخالص الشكر والتقدير والامتنان لكلية الهندسة بجامعة عمر المختار والتي تم إجراء معظم التجارب في معاملها ويشمل الشكر جميع القائمين على هذه المؤسسة. كما نخص بالشكر العاملين بمعامل مصنع إسمنت الفتائح بدرنة لتسهيلهم إجراء التجارب الكيميائية.

المراجع

[1]. نورالدين الطوير و مختار أبو راوي (2016)، دراسة مقارنة تأثير مصادرالاسمنت على خصائصه الهندسية.
6th Conference of Building Materials and Structural Engineering, Faculty of Engineering At: University of Western Mountain – Gharyan, Libya

[2]. M. Liska and A. Al-Tabbaa (2008), Performance of magnesia cements in pressed masonry units with natural aggregates: Production parameters optimization, Construction and Building Materials, 22, pp.1789–1797.

[3]. M. Sidney and F.J. Young (1981), Concrete, Prentice-Hall Inc., New Jersey.
[4]. Adam M. Neville, J. J. Brooks (1987), Concrete Technology, 2nd Edition.
[5]. American Society for Testing and Materials:
[6]. ASTM C191-13 Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle.
[7]. ASTM C150-02 Standard Specification for Portland cement.
[8]. ASTM C114-00 Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement.
[9]. ASTM C184-94 Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement.
[10]. ASTM C188-95 Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement.
[11]. ASTM C187-11 Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste.
[12]. ASTM C151-00 Standard Test Method for Autoclave Expansion of Portland Cement.
[13]. ASTM C109-02 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars.
[14]. ASTM C348-08 Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars.
[15]. ASTM C190-00 Standard Test Method for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars.