

دراسة التغيرات المعدنية والكيميائية لمزيج المواد الخام المستخدمة في إنتاج الكلنكر والأسمنت البورتلندي المقاوم للكبريتات لمعمل الحدباء، حمام العليل، العراق

صفاة رجب محمد الجبوري ساهره محمد عثمان المعاضيدي

قسم علوم الأرض/كلية العلوم

جامعة الموصل

تاريخ الاستلام 2021/10/15 ، تاريخ القبول 2021/12/8

الملخص

تم جمع 24 نموذجاً (6 نماذج معجون مزيج المواد الخام، 9 نماذج كلنكر الأسمنت، 9 نماذج أسمنت مقاوم للكبريتات) خلال فترة أربعة أشهر من خط إنتاج معمل أسمنت الحدباء في ناحية حمام العليل جنوبي مدينة الموصل والذي يعمل بطريقة الإنتاج الرطبة. تم تحليل بعض النماذج المدروسة تحليلاً معدنياً بجهاز حيود الأشعة السينية XRD وتحليلاً كيميائياً بجهاز الأشعة السينية الوميضية XRF والطرائق الكيميائية الوزنية التسحيحية، ودراسة نماذج الكلنكر بتروغرافياً بمجهر الضوء المنعكس وإستعمال محاليل الحفر etching solutions. يهدف البحث دراسة تباين المحتوى المعدني والكيميائي في النماذج المدروسة.

أظهرت الدراسة المعدنية والبتروغرافية عدم وجود تباين كبير في المحتوى المعدني بين نماذج النوع الواحد، وأن الاختلاف هو في نسبة وجود المعادن. ويحتوي مزيج المواد الخام على معدن الكلسايت والكوارتز بشكل رئيس. أما الكلنكر والأسمنت، فيحتوي على طور الألايت C3S نوع النمو المستقر (النقي) ذي النظام البلوري الأحادي الميل، ونوع النمو غير المستقر (غير النقي والمحتوي على المكتنفات) ذي النظام البلوري الثلاثي. إضافة إلى طور البيلايت C2S نوع الأشكال α , β , and $\bar{\alpha}$ وطور الألومينييت نوع C3A وC12A7 والنوع القلوي المحتوي على Na، وطور الفيرايت نوع C4AF وC2F و طور الزجاج glass ذو التبلور الناعم. وأشارت الدراسة الكيميائية أن محتوى معظم المكونات الرئيسية SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , Na_2O , K_2O , TiO_2 , MnO , P_2O_5 , Cl , LOI المدروسة. وهي مطابقة للمواصفات المقترحة من قبل بعض الباحثين بإستثناء الانحراف في K_2O , Fe_2O_3 . ولوحظ من مقارنة محتوى الكلنكر المتوقع مع الكلنكر الفعلي إضافة إلى حساب بعض معاملات السيطرة النوعية (عامل الإشباع الكلسي، معامل السليكا والألومينا) إلى وجود إستقرار نسبي في محتوى المزيج الخام والأسمنت المنتج في معمل الأسمنت المدروس.

الكلمات الدالة: مزيج المواد الخام، كلنكر الأسمنت المقاوم، عامل الإشباع الكلسي، الأطوار المعدنية للأسمنت.

Study of the Mineral and Chemical Variation of the Raw Material Mix Used for Production of the Clinker and the Sulfate Resistant Portland Cement of Al-Hadbaa Plant, Hammam Al-Alil, Iraq

Safaa Rejeb M. Al-Jubouri

Sahra M. Othman Al-Maadhidee

Department of Geology/College of Science

University of Mosul

ABSTRACT

Twenty-four samples (6 samples of raw material mix slurry, 9 samples of cement clinker, 9 samples of sulfate resistant cement) are collected during four months from the production line of Al-Hadbaa Cement Plant, which operates in a wet production method, in Hammam Al-Alil district, south of Mosul city. Some of the studied samples are

analyzed for mineral diagnosis by X-ray diffraction device, chemical analysis by X-ray fluorescence device, gravimetric titrimetric chemical methods, and petrographic study for the clinker samples by reflected light microscope and using etching solutions. The research aims to study the variation of the mineral and chemical content in the studied samples.

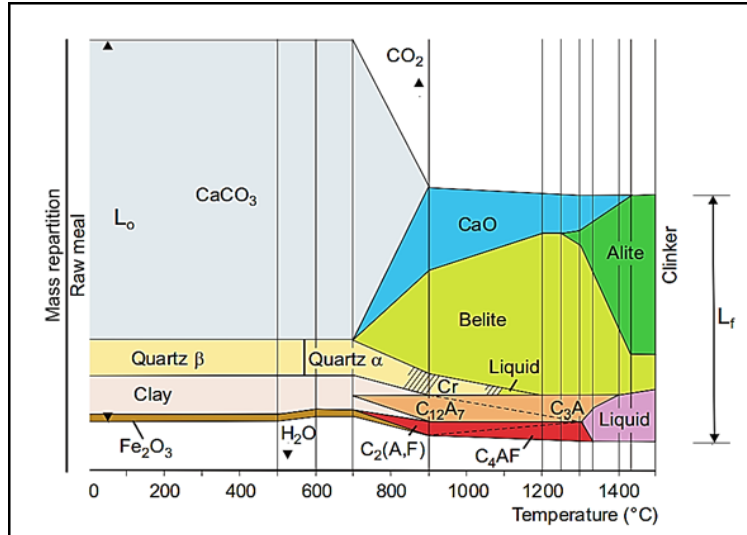
The mineral and petrographical study show that there is no significant difference in the mineral content between the samples of the same type and that the difference is in the percentage of the presence of minerals. The raw materials mix mainly contains calcite and quartz. As for clinker and cement, it contains a lite phase C_3S with a stable growth (pure) type with a monoclinic crystal system and a type of unstable growth (impure and containing inclusions) with a trigonal crystal system. In addition to the belite phase C_2S of shapes β , α , and $\bar{\alpha}$, the aluminate phase C_3A and $C_{12}A_7$ type and the alkaline type containing Na, the ferrite phase C_4AF and C_2F and the phase of fine crystalline glass. The chemical study indicates that the content of most of the main components SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , Na_2O , K_2O , TiO_2 , MnO , P_2O_5 , Cl, and LOI for the raw materials mix, clinker, and cement are close to the samples of the same type of the studied samples. It confirms the proposed specifications by some researchers, except for the deviation in K_2O , Fe_2O_3 . It is noticed from comparing the expected clinker content with the actual clinker, as well as calculating some of the qualitative control modules (lime saturation factor, silica, and alumina modulus) to the presence of relative stability in the content of the raw mix and cement produced in the studied cement plant.

Keywords: Raw material mix, Resistant cement clinker, Lime saturation factor, Mineral phases of cement.

المقدمة

تعتمد صناعة الأسمنت على مواد أولية متباينة المحتوى الكيميائي، وتتأثر نوعية وخواص الاسمنت المنتج باختلاف المكونات المعدنية والكيميائية للمواد الأولية ودرجة تجانسها، لذا يجب دراسة خواصها قبل إعتماها في صناعة الأسمنت لضمان الحصول على نوعية جيدة وبأقل إستهلاك للطاقة (Jefferson, 1977; Gouda, 1983). يُصنع الأسمنت البورتلندي من مواد كلسية (طبيعية مثل الصخور الجيرية أو مواد مصنعة) وتشكل حوالي 75-80% من مزيج المواد الخام المستخدم في صناعة الأسمنت، وكذلك مواد طينية (طبيعية مثل الصخور الطينية أو مواد مصنعة مثل خبث الأفران) وتشكل حوالي 20-25% من مواد المزيج الخام، إضافة إلى إستخدام خام أكاسيد الحديد في حالة تصنيع أسمنت مقاوم للكبريتات، أما صخور الجبس، فتضاف أثناء طحن الكلنكر المنتج. وتم إنشاء مصانع الأسمنت حيث تتوفر هذه المواد، وبعد تحديد صلاحيتها من حيث نقاوتها وتجانسها ومطابقتها للمتطلبات الكيميائية والفيزيائية (Nelson and Guillot, 2006; Neville, 2011; Shetty and Jain, 2019).

يتم إنتاج الأسمنت البورتلندي من خلال تهيئة المزيج الخام وذلك بمزج النسب الملائمة للمواد الخام (الصخور الجيرية والطينية) وفق متطلبات المواصفة القياسية المعتمدة، وبعد خلطها بشكل جيد يتم حرقها في فرن دوار كبير تصل درجة حرارته إلى $1450^{\circ}C$ في نطاق الحرق، حيث يبدأ تفكك المكونات المعدنية للمواد الأولية وصهرها في درجات الحرارة العالية ليُعاد تفاعلها مع بعض لتكوين أطوار معدنية جديدة وكما موضح في الشكل (1). تتجمع هذه الاطوار المعدنية معاً لتكون عقداً بشكل كرات مختلفة الحجم تعرف بأسم الكلنكر، ويتم تبريد الكلنكر ثم طحنه مع إضافة 3-5% من صخور الجبس أثناء الطحن ليكون الناتج أسمنتاً بورتلندياً بشكل مسحوق ناعم (Kosmatka and Wilson, 2011; Aitcin and Flatt, 2016; Shetty and Jain, 2019).



الشكل 1: مديات درجة حرارة إستقرارية وتفكك الأطوار المعدنية للمواد الخام وتكوين أطوار الكلنكر خلال الحرق بالفرن الدوار والمحسوبة من قبل (Aitcin and Flatt, 2016).

تُعد الأكاسيد الأربعة الرئيسية (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) الناتجة من تفكك المواد الخام كمكونات رئيسية للأسمنت المنتج، وتشكل حوالي (95%) من كتلة الأسمنت. وتفاعل هذه الأكاسيد مع بعضها أثناء عملية الكلسنة والحرق يؤدي إلى تكوين الأطوار المعدنية الرئيسية والمتمثلة بسليكات ثلاثي الكالسيوم C_3S وسليكات ثنائي الكالسيوم C_2S وألومينات ثلاثي الكالسيوم C_3A وألومينات حديد رباعي الكالسيوم C_4AF . هذه الأطوار المعدنية لا توجد بحالة نقية، وإنما تحتوي على كميات قليلة من أكاسيد ثانوية أخرى بشكل إحلل، وهذا الإحلل يُسبب تغييراً في تركيبها الكيميائي والبلوري وبالتالي تغييراً في خواصها، لذا فإن خواص الأسمنت البورتلندي تختلف باختلاف نوع ونسب وجود هذه الأطوار المعدنية (Soroka, 1979; Duggal, 2008; Xincheng, 2013; Rahman, et al., 2015). أما المكونات الثانوية للأسمنت فتتمثل بالأكاسيد الثانوية (MgO , SO_3 , Na_2O , K_2O , TiO_2 , MnO , P_2O_5 , Cl) وعادةً تشكل أقل من 5% من كتلة الأسمنت، وتعد هذه الأكاسيد الناتجة من المواد الخام والوقود كشوائب لها تأثير كبير على خواص وجودة الأسمنت المنتج (Nelson and Guillot, 2006; Neville, 2011). ويهدف إنتاج أسمنت ذي جودة عالية، يتطلب الأمر عملياً إجراء المراقبة المباشرة حيث يتم ضبط وتقييم محتوى المزيج الخام والكلنكر والأسمنت من خلال إجراء التحليل الكيميائي للعناصر الرئيسية والثانوية وحساب بعض المعاملات (Lime saturation factor, Silica modulus, Alumina modulus, and Alkali equivalent) من نتائج التحليل الكيميائي وبشكل متكرر ومستمر خلال إنتاج الأسمنت (Schafer, 1987; Taylor, 1997; Hewlett and Liska, 2019). هدف البحث دراسة التغيرات المعدني والكيميائي في النماذج المختلفة المدروسة، ومدى توافقها مع المواصفات المطلوبة.

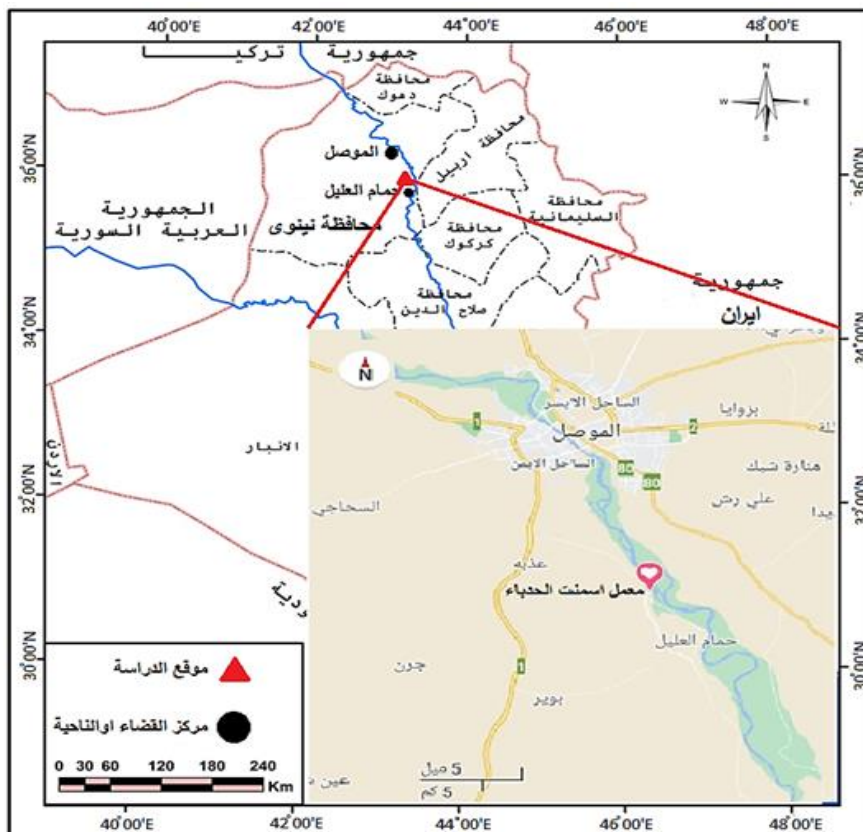
موقع الدراسة والنمذجة

تمت الدراسة الحالية على نماذج من معمل أسمنت الحدياء (حمام العليل القديم سابقاً) في محافظة نينوى- شمالي العراق، الواقع على بعد 20 كم جنوبي مدينة الموصل وعلى بعد 6 كم من ناحية حمام العليل والموضح موقعه في الشكل (2). يعمل هذا المعمل بطريقة الإنتاج الرطبة لإنتاج الأسمنت المقاوم للكبريتات، وحالياً ينتج أسمنت أبار النفط صنف B و G وأسمنت تحشية السودود (إنجازات، منشور معاونة السمنت الشمالية، 2019).

أما المواد الأولية المستخدمة لإنتاج الأسمنت في المعمل المذكور فهي الصخور التابعة لتكوين فتحة (عمر المايوسين الأوسط Middle Miocene). حيث يستثمر الصخور الجيرية من منطقة طقق من التابعة لناحية حمام العليل وقرب قرية العريج جنوبي مدينة الموصل، والصخور الطينية تُؤخذ من منطقة جهوني بين قرية منيرة والخربة في الجنوب الشرقي لمدينة الموصل، أما صخور الجبس فتقع جنوب مقالع منطقة طقق. وتُستعمل أكاسيد الحديد أيضاً حيث تُستخدم مخلفات راسب حديد الحسينيات أو ما يسمى تراب الحديد (العجيل وحمودي، 1990; كلي، 2006).

تم جمع 24 نموذجاً (6 نماذج معجون مزيج المواد الخام أُخذت من أحواض المزج، 9 نماذج كلنكر الأسمنت المقاوم للكبريتات أُخذت من مخازن الكلنكر، 9 نماذج أسمنت مقاوم للكبريتات أُخذت من خزانات الأسمنت) من

خط إنتاج معمل الحدياء وعلى مدى 4 أشهر والموضحة تفصيلها في الجدول (1). تم جمع النماذج بمساعدة إدارة المعمل المذكور، وكانت الكميات المأخوذة بين 5-7 كغم للنموذج الواحد.



الشكل 2: خارطة توضح موقع الدراسة (الشريفي، 2013; <https://goo.gl/maps/Ci7VZQkoggbSaLRj8>).

الجدول 1: معلومات عن نماذج الدراسة الحالية المأخوذة من معمل أسمنت الحدياء.

نوع النموذج	تاريخ أخذ النموذج	رقم النموذج
معجون مزيج المواد الخام Raw material mix slurry	10/7/2019	RM7-1
	22/7/2019	RM7-2
	4/8/2019	RM8-1
	25/8/2019	RM8-2
	22/9/2019	RM9-1
	3/10/2019	RM10-1
كلنكر الاسمنت البورتلندي Portland cement clinker	10/7/2019	CK7-1
	22/7/2019	CK7-2
	4/8/2019	CK8-1
	18/8/2019	CK8-2
	25/8/2019	CK8-3
	5/9/2019	CK9-1
	15/9/2019	CK9-2
	22/9/2019	CK9-3
3/10/2019	CK10-1	
الأسمنت المقاوم للكبريتات Sulphate resistance cement	10/7/2019	CM7-1
	22/7/2019	CM7-2
	4/8/2019	CM8-1
	18/8/2019	CM8-2
	25/8/2019	CM8-3
	5/9/2019	CM9-1
	15/9/2019	CM9-2
	22/9/2019	CM9-3
3/10/2019	CM10-1	

تهيئة النماذج وطرائق العمل

بعد جمع النماذج من موقع الإنتاج بالكميات المطلوبة تم حفظها في أكياس نايلون لعزلها عن الهواء والرطوبة والتلوث ولنقلها لموقع التحليل. تم تجفيف معجون المزيج الخام بدرجة حرارة الغرفة البالغة (30-35°C)، بعدها أخذ 100 غم من معجون المزيج الخام والكلنكر لتكسيرها ثم طحنها بواسطة طاحونة Tima swing mill الموجودة في ورشة قسم علوم الأرض/كلية العلوم/جامعة الموصل لنحصل على مسحوق ناعم بحجم أقل من 0.75 ملم أما الأسمنت فهو بشكل مسحوق، وتم حفظها في أكياس نايلون جافة لإستخدامها في التحليل المعدني والكيميائي. وتم أيضاً تكسير عقد من الكلنكر إلى قطع بحجم 0.5 - 1 سم لعمل الكتل المصقولة Polished blocks وحسب الطريقة المذكورة من قبل (Hutchison, 1974) لإستخدامها للدراسة البتروغرافية.

تم إجراء التحليل المعدني للنماذج الكلية Bulk samples لبعض النماذج المدروسة (المزيج الخام، الكلنكر والأسمنت المقاوم للكبريتات) بإستخدام جهاز حيود الأشعة السينية نوع ADX 2700 الموجود في هيئة البحث والتطوير الصناعي في بغداد/وزارة الصناعة والمعادن. وتم إجراء الدراسة البتروغرافية للكتل المصقولة لبعض نماذج كلنكر الأسمنت بإستخدام مجهر الضوء المنعكس نوع Optica reflected microscope الموجود في قسم علوم الأرض/كلية العلوم/جامعة الموصل وبإستخدام محاليل الحفر Etching solutions من الماء المقطر وحامض النتريك الكحولي وحسب الطريقة المعتمدة من قبل (Campbell, 1999).

وتم إجراء التحليل الكيميائي للعناصر الرئيسية والثانوية (SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, SO₃) لبعض النماذج المدروسة بإستعمال جهاز الأشعة السينية الويضية الموجود في معمل أسمنت بادوش التوسيع/معاونيه السمنت الشمالية ومن نوع Minipal4، والعناصر (P₂O₅, Fe₂O₃, TiO₂, K₂O, Na₂O, MnO, Cl) لبعض النماذج المدروسة بإستعمال جهاز XRF الموجود في المختبر الألماني/قسم علوم الأرض/كلية العلوم/جامعة بغداد ومن نوع Specro Xepos وحسب ظروف التشغيل المعتمدة لدى المختبر.

أما إيجاد نسبة المتبقي غير الذائب (الفضالة غير الذائبة) Insoluble Residue والفقدان بالحرق Loss On Ignition في نماذج المزيج الخام فتم إجراؤها حسب الطريقة المذكورة من قبل (Hutchison, 1974)، في حين تم إيجاد نسبة المتبقي (الفضالة) غير الذائب والفقدان بالحرق ونسبة الكلس الحر Free Lime في نماذج الكلنكر والأسمنت بموجب الطرائق المذكورة في الدليل الإسترشادي المرجعي (رقم 472، 1993). وتم حساب نسبة ثاني أكسيد الكربون في نماذج المزيج الخام بإستعمال الطريقة المعتمدة في المواصفة الأمريكية (ASTM D1756, 2002).

ونظراً لتوقف معمل أسمنت الحدباء عن الإنتاج لعدة مرات خلال فترة النمذجة ولأسباب فنية خاصة بالمعمل لذا فإن بعض النماذج التي تم جمعها كانت من نفس وجبة العمل، علاوة على تكاليف التحاليل الباهضة، لذا تم تقليل عدد النماذج التي تم تحليلها إلى نموذج واحد من كل شهر ولكل نوع من النماذج المدروسة خلال فترة النمذجة.

حساب بعض المعاملات الكيميائية ومحتوى الاطوار المعدنية الرئيسية

تم حساب بعض المعاملات لنماذج الدراسة الحالية من التحليل الكيميائي لها وهذه المعاملات هي:

1- عامل الاشباع الكلسي Lime saturation factor:

لحساب المحتوى الأمثل للكلس في المزيج الخام والكلنكر (إعتماداً على محتوى المغنيسيا الذي يمكن أن يحل محل 2% من محتوى CaO في بعض الاطوار المعدنية الرئيسية) للتفاعل مع الأكاسيد الرئيسية (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃) بدون بقاء كلس حر. تم اعتماد الصيغة المذكورة من قبل (Kohlhaas, et al., 1983; Chatterjee, 2018) والمتمثلة بالآتي:

$$LSF(MgO > 2\%) = \frac{100(CaO + 1.5MgO)}{2.8 SiO_2 + 1.18 Al_2O_3 + 0.65 Fe_2O_3}$$

أما لحساب هذا المعامل للأسمنت المقاوم للكبريتات فتم اعتماد الصيغة المذكورة في المواصفة القياسية العراقية (رقم 5، 1984) والمعتمدة في معمل الحدباء وحسب الآتي:

$$LSF = \frac{100(CaO - 0.7 SO_3)}{2.8SiO_2 + 1.2 Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3}$$

2-معامل السليكا Silica Modulus:

يستعمل للسيطرة على نسبة SiO_2 المطلوب تفاعلها مع أكاسيد (Al_2O_3, Fe_2O_3) لتكوين الكلنكر بشرط عدم إحتوائه على سليكا حرة يصعب تفكيكها أثناء الحرق. ولحساب هذا المعامل في نماذج مزيج المواد الخام والكلنكر والأسمنت تم إعتداد الصيغة المذكورة من قبل (Kohlhaas, et al., 1983; Hewlett and Liska, 2019) والمتمثلة بالآتي:

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

3-معامل الألومينا Alumina Modulus:

يستعمل للسيطرة على نسبة أكاسيد (Al_2O_3, Fe_2O_3) في المزيج الخام أي محتوى الطور السائل أثناء الحرق. ولإنتاج الأسمنت المقاوم للكبريتات يتم تقليل قيمة هذا المعامل بزيادة نسبة Fe_2O_3 من خلال إضافة خام أكاسيد الحديد (تراب الحديد) بهدف زيادة محتوى طور $C4AF$ وتقليل طور $C3A$. ولحساب هذا المعامل في نماذج المزيج الخام والكلنكر والأسمنت المقاوم المدروسة، تم إعتداد الصيغة المذكورة من قبل (Kohlhaas, et al., 1983; Hewlett and Liska, 2019) والمتمثلة بالآتي:

$$AM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

4-مكافئ القلويات Alkali Equivalent:

يستعمل للسيطرة على محتوى القلويات (Na_2O, K_2O) والحد من زيادتها لتقليل المشاكل التي تسببها أثناء الحرق بسبب تطايرها ودورانها في الفرن الدوار، علاوة على الأضرار الناجمة عن تفاعل القلويات مع السليكا الحرة غير المتبلورة أو الضعيفة التبلور مثل الفلنت والابوال الموجودة في ركام الخرسانة أو الملاط مكونة معقدات قلوية ذات توسع حجمي مسببة حدوث تشققات وعدم ثبات الأسمنت (Duda, 1977; Barnes and Bensted, 2002). ولحساب هذا المعامل في النماذج المدروسة تم إعتداد الصيغة المذكورة من قبل (Schafer, 1987; Barnes and Bensted, 2002) والمتمثلة بالآتي:

$$\text{Alkali Equivalent (AEQ)} = Na_2O + 0.659 K_2O$$

5-نسبة الطور السائل Liquid phase في نطاق الحرق:

يستعمل لحساب نسبة الطور السائل المتكون في نطاق الحرق عند درجة $1450^\circ C$ إعتقاداً على قيمة معامل الألومينا. ولحساب هذا المعامل في نماذج الكلنكر والأسمنت المدروسة تم إعتداد الصيغة المذكورة من قبل (Lea, 1956; Hewlett and Liska, 2019) والمتمثلة بالآتي:

$$\text{If } AM (Al_2O_3/Fe_2O_3) > 0.64$$

$$\% \text{ LQP at } 1450^\circ C = 3 Al_2O_3 + 2.25 Fe_2O_3 + MgO + K_2O + Na_2O + SO_3$$

تم حساب المعاملات الكيميائية المذكورة آنفاً بإستعمال نتائج التحليل الكيميائي لنماذج الدراسة الحالية والموضحة في الجدول (2). ويوضح الجدول (3) قيم هذه المعاملات المحسوبة ومعدلاتها.

أما حساب نسبة الأطوار المعدنية الرئيسية للكلنكر والأسمنت والكلنكر فتم بعدة طرائق أكثرها شيوعاً هي طريقة Bogue وهي طريقة حسابية تقريبية تستعمل لحساب مكونات الطور المحتملة Potential phase composition للكلنكر أو الأسمنت من التحليل الكيميائي له. إن طريقة Bogue تتمثل بعدد من المعادلات إعتقاداً على قيم معامل الألومينا. تم حساب المحتوى الكمي للأطوار الرئيسية في نماذج الكلنكر والأسمنت قيد الدراسة وإستعمال التحليل الكيميائي لها وحسب المعادلات المذكورة من قبل (Lea, 1956; Aitcin, 2008; Hewlett and Liska, 2019) والمتمثلة بالمعادلات الآتية:

$$\text{Bogue's potential composition, If } AM (Al_2O_3/Fe_2O_3) > 0.64$$

الجدول 2: محتوى ومعدلات أكاسيد العناصر الرئيسية والثانوية وبعض المكونات الثانوية (wt%) في عدد من نماذج مزيج المواد الخام RM وكلنكر الأسمنت CK والأسمنت المقاوم للكبريتات CM للدراسة الحالية.

Sample No. Constituent wt%	Raw material mix					Cement Clinker				
	RM 7-1	RM 8-1	RM 9-1	RM 10-1	Average	CK 7-1	CK 8-1	CK 9-1	CK 10-1	Average
SiO ₂	13.08	13.18	12.71	13.08	13.01	19.90	19.94	20.02	19.98	19.96
Al ₂ O ₃	3.57	3.74	3.80	3.61	3.68	5.62	5.75	5.68	5.62	5.67
Fe ₂ O ₃	3.56	3.70	3.81	4.33	3.85	6.52	5.45	5.50	6.95	6.10
CaO	40.41	40.51	40.70	40.48	40.53	60.34	60.96	60.77	60.14	60.55
MgO	2.37	2.19	2.59	2.28	2.36	3.85	3.75	3.95	3.86	3.85
SO ₃	0.48	0.46	0.61	0.44	0.50	1.18	1.20	1.22	1.17	1.19
Na ₂ O	0.51	0.51	0.55	0.52	0.52	0.94	1.22	0.97	0.82	0.99
K ₂ O	0.36	0.36	0.34	0.35	0.35	0.24	0.61	0.52	0.38	0.44
TiO ₂	0.28	0.28	0.28	0.24	0.27	0.39	0.37	0.33	0.33	0.36
MnO	0.15	0.15	0.15	0.11	0.14	0.33	0.24	0.25	0.17	0.25
P ₂ O ₅	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06
Cl	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
LOI	35.17	34.86	34.41	34.51	34.74	0.62	0.44	0.72	0.52	0.57
Total (Recal.)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
IR	7.60	7.71	6.99	8.16	7.62	0.87	0.74	0.95	0.80	0.84
FL	—	—	—	—	—	0.62	0.67	0.56	0.67	0.63
CO ₂	30.2	26.7	27.1	26.5	27.63	—	—	—	—	—

$$C3S = 4.071(CaO - \text{Free lime}) - 7.6 SiO_2 - 6.718Al_2O_3 - 1.43Fe_2O_3 - 2.852 SO_3 \dots (1)$$

$$C2S = 2.867 SiO_2 - 0.754 C3S \dots (2)$$

$$C3A = 2.65 Al_2O_3 - 1.692 Fe_2O_3 \dots (3)$$

$$C4AF = 3.043 Fe_2O_3 \dots (4)$$

$$\text{Gypsum \%} = 2.15 SO_3 \dots (5)$$

يتبع جدول (2)

Sample No. Constituent wt%	Sulfate Resistant cement				
	CM 7-1	CM 8-1	CM 9-1	CM 10-1	Average
SiO ₂	19.73	19.72	19.56	19.73	19.69
Al ₂ O ₃	5.52	5.46	5.50	5.46	5.48
Fe ₂ O ₃	6.08	6.49	5.41	5.28	5.82
CaO	58.86	58.29	58.37	58.67	58.55
MgO	3.60	3.60	3.56	3.64	3.60
SO ₃	2.25	2.30	2.26	2.28	2.27
Na ₂ O	1.18	1.58	1.47	1.49	1.43
K ₂ O	0.21	0.18	0.26	0.29	0.23
TiO ₂	0.34	0.34	0.34	0.31	0.33
MnO	0.29	0.32	0.23	0.21	0.26
P ₂ O ₅	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06
Cl	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
LOI	1.87	1.65	2.98	2.58	2.27
Total (Recal.)	100	100	100	100	100
IR	0.28	0.43	1.06	1.09	0.72
FL	0.90	1.01	0.95	0.84	0.93
CO ₂	—	—	—	—	—

إن المواصفة القياسية العراقية (رقم 5، 1984) والمعدلة لعام 2019 حددت حساب محتوى طور C_3A بمعادلة مشابهة لمعادلة رقم (3) المذكورة آنفاً.

ويوضح الجدول (3) محتوى الأطوار المعدنية الرئيسية لنماذج الكلنكر والأسمنت المقاوم للكبريتات ومعدلاتها.

الجدول 3: محتوى ومعدلات الأطوار المعدنية الرئيسية وبعض المعاملات الكيميائية المحسوبة لنماذج مزيج المواد الخام RM، كلنكر الأسمنت CK والأسمنت المقاوم للكبريتات CM للدراسة الحالية.

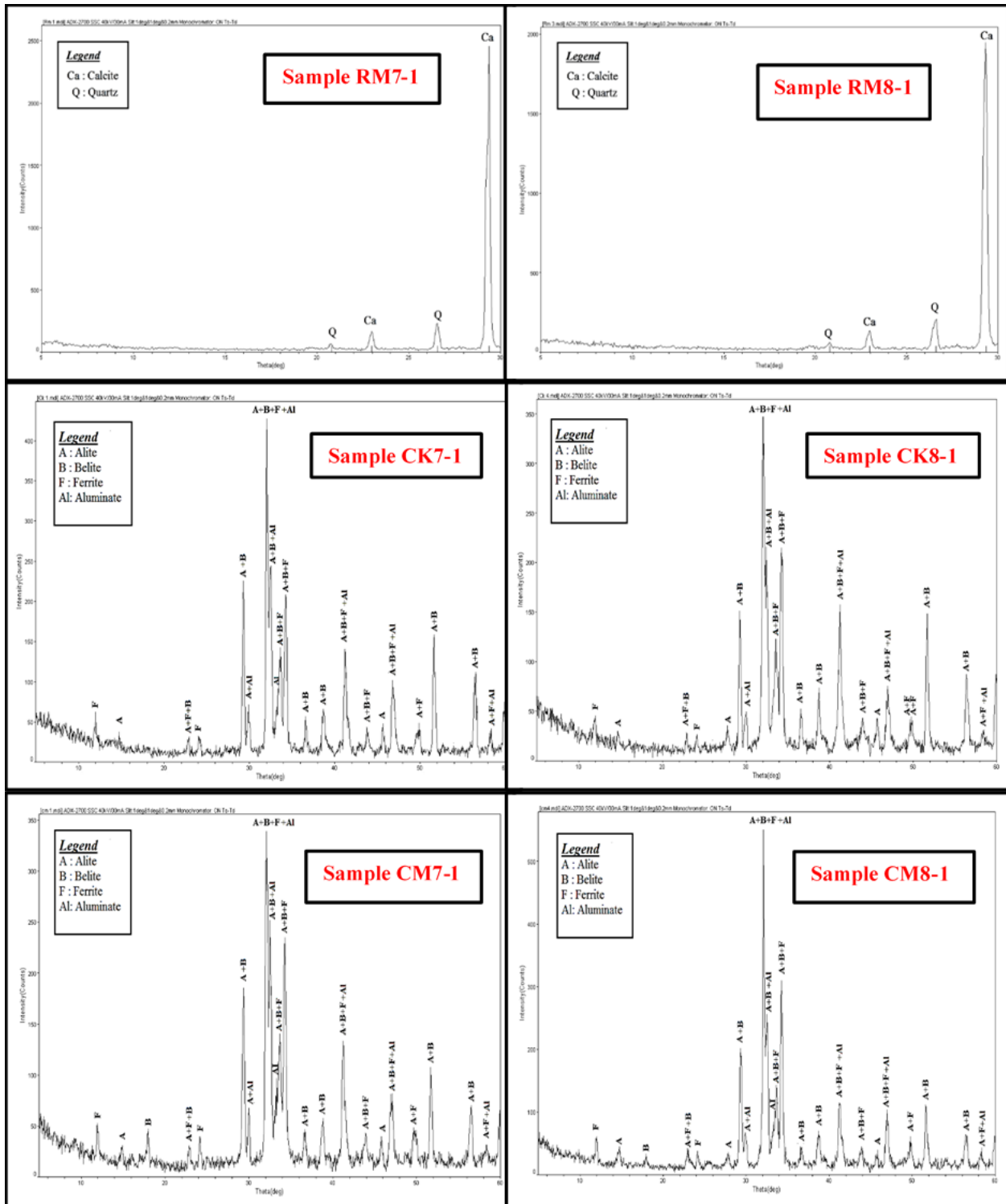
Const. or Ratio Sample No.	C3S %	C2S %	C3A %	C4AF %	Gyp. %	LQP %	AEQ %	LSF %	SM	AM
RM7-1	—	—	—	—	—	—	0.8	100	1.8	1
RM8-1	—	—	—	—	—	—	0.8	99	1.8	1
RM9-1	—	—	—	—	—	—	0.8	103	1.7	1
RM10-1	—	—	—	—	—	—	0.8	99	1.7	0.8
Average	—	—	—	—	—	—	0.8	100	1.8	1
CK7-1	41.4	25.8	3.9	19.8	2.5	37.7	1.1	98	1.6	0.9
CK8-1	44.1	24	6	16.6	2.6	36.3	1.6	99	1.8	1.1
CK9-1	43.5	24.6	5.8	16.7	2.6	36.1	1.3	99	1.8	1
CK10-1	39.2	27.7	3.1	21.1	2.5	38.7	1.1	97	1.6	0.8
Average	42.1	25.5	4.7	18.6	2.6	37.2	1.3	98	1.7	1
CM7-1	33.8	31.1	4.3	18.5	4.8	37.5	1.3	87	1.7	0.9
CM8-1	30.8	33.3	3.5	19.7	5	38.6	1.7	86	1.7	0.8
CM9-1	34	30.5	5.4	16.5	4.9	36.2	1.6	88	1.8	1
CM10-1	34.7	30.4	5.5	16.1	4.9	36	1.7	88	1.8	1
Average	33.3	31.3	4.7	17.7	4.9	37.1	1.6	87	1.8	0.9

النتائج والمناقشة

الدراسة المعدنية والبتروغرافية

يوضح الشكل (3) مخططات حيود الأشعة السينية لإنعكاسات المعادن الرئيسية لتحليل النموذج الكلي Bulk sample لبعض نماذج الدراسة، تم تشخيص المكونات المعدنية لنماذج المزيج الخام اعتماداً على بيانات (Highway Research Board, 1972; Brindley and brown, 1980)، والمعادن الرئيسية هي الكلسايت والكوارتز. لوحظ أن المحتوى المعدني للنماذج المدروسة متشابه والاختلاف في نسبة وجود هذه المعادن الرئيسية. إن سبب تشابه المحتوى المعدني لأن المزيج الخام المدروس يَحضر في معمل الحديد من مزج نسب محددة من المواد الأولية العائدة لمصدر واحد وهو تكوين فتحة، لذا لا يوجد تباين كبير في المحتوى المعدني للنماذج المأخوذة خلال فترة النمذجة.

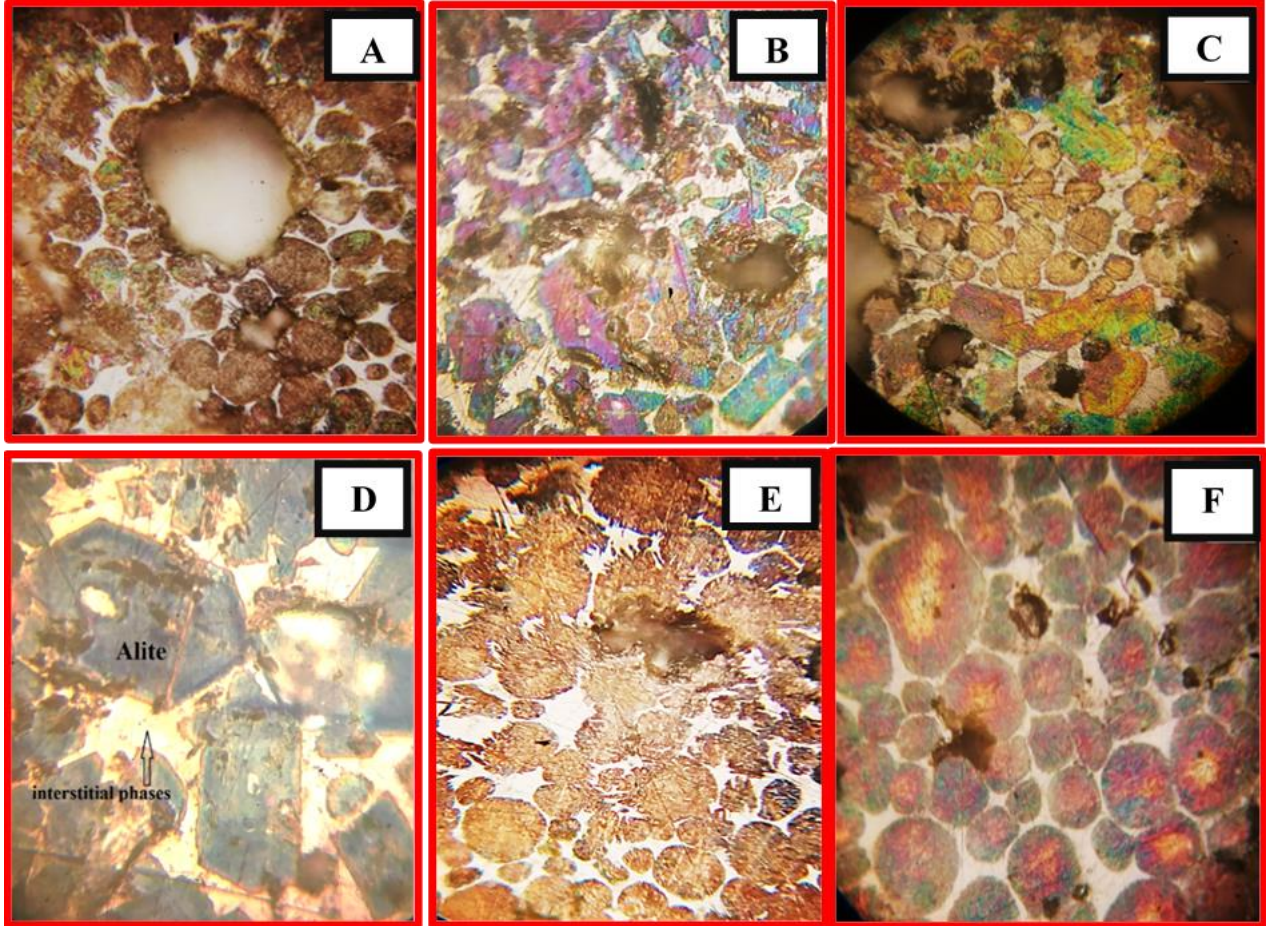
تم تشخيص الأطوار المعدنية لنماذج الكلنكر والأسمنت والموضحة في الشكل (3) اعتماداً على بيانات (Lea, 1970)، وتبين أن نماذج الكلنكر والأسمنت تتشابه في محتواها المعدني والاختلاف هو في نسبة وجود الأطوار المعدنية. حيث تم تمييز الأطوار المعدنية الرئيسية وهي طور الألايت C_3S نوع النمو غير المستقر وغير النقي ذو النظام البلوري الثلاثي ونوع النمو المستقر والنقي ذو النظام البلوري الأحادي الميل، وطور البيلايت C_2S حيث تم تمييز الأشكال (β , α and $\bar{\alpha}$)، وطور الألومينيت C_3A من النوع ذي النظام البلوري المكعبي وعلى الأغلب شكل (C_3A and $C_{12}A_7$) والنوع القلوي المحتوي على الصوديوم ذي النظام البلوري المعيني القائم، وكذلك طور الفيرايت نوع (C_4AF and C_2F) ذي النظام المعيني القائم.



الشكل 3: مخططات حيود الأشعة السينية لإنعكاسات المعادن الرئيسية لبعض نماذج (الكلية Bulk) المزيج الخام وإنعكاسات الأطوار المعدنية الرئيسية لبعض نماذج كلنكر الأسمنت والأسمنت المقاوم للكبريتات في الدراسة الحالية.

أوضحت الدراسة البتروغرافية للمقاطع المصقولة لنماذج الكلنكر قيد الدراسة إمكانية تشخيص الأطوار المعدنية الرئيسية والتعرف على ظروف الإنتاج (طبيعة المزيج الخام من حيث حجم حبيباته وتجانسها وظروف الحرق والتبريد) من خلال التعرف على نوع وشكل وحجم وتوزيع بلورات الأطوار المعدنية المختلفة، وتبين إحتواء نماذج الكلنكر على نوعين من طور الألائيت، النوع المستقر (النقي) ويوجد بشكل بلورات منتظمة الشكل ومكتملة الأوجه وبعضها بشكل سداسي كاذب وتحتوي على ندى من المكثفات (الشوائب) (لوحة D-1)، والنوع غير المستقر (غير النقي) ويوجد بشكل بلورات كبيرة الحجم وغير منتظمة الحدود وتحتوي على مكثفات من طور

البيلايت والكلس الحر والأطوار البيينية (لوحة B-1)، ويغتني الكلنكر المأخوذ خلال شهر التاسع بهذا الطور. أما طور البيلايت فيوجد بشكل بلورات مدورة تحتوي على تركيب داخلي بشكل خطوط أو رقائق أو صفائح ناتجة عن تحولات الأشكال المتعددة وكانت الأشكال من نوع (β , α , and $\bar{\alpha}$) (لوحة A-1، لوحة E-1 و لوحة F-1). أما الأطوار البيينية (الألومينيت والفيرايت) فتظهر بشكل طور الزجاج ذي التبلور الناعم. ولوحظ وجود تجمعات عنقودية من بلورات طور البيلايت والألايت حول فراغ، وهذه تشير إلى عدم تجانس حبيبات المزيج الخام المغذي للفرن. وعدم التجانس هذا يؤدي الى تكوين بلورات كبيرة الحجم من طور الألايت والبيلايت (لوحة C-1).



لوحة 1: صور للأطوار المعدنية لنماذج كلنكر الأسمنت المدروس بمجهر الضوء المنعكس.

قوة التكبير: 100X-400X المقياس: 1cm = 30 μ m

وتم تمييز الكلس الحر الناتج من تحلل طور الألايت الى طور البيلايت الثانوي والكلس الحر نتيجة الخزن غير الجيد للكلنكر. إن إحتواء نماذج الكلنكر للشهر السابع والثامن على بلورات صغيرة إلى متوسطة الحجم من طور البيلايت والألايت يشير إلى ظروف الحرق السريع والتبريد السريع-المتوسط. أما إحتواء نماذج الكلنكر للشهر التاسع والعاشر على بلورات ذات أحجام متوسطة الى كبيرة من طور البيلايت والألايت فيشير إلى ظروف الحرق البطيء والتبريد السريع-المتوسط (Taylor, 1997; Campbell, 1999).

الدراسة الكيميائية

يوضح الجدول (2) المذكور آنفاً، محتوى العناصر الرئيسية والثانوية وبعض المكونات الثانوية ومعدلاتها لنماذج الدراسة الحالية (المزيج الخام والكلنكر والأسمنت المقاوم للكبريتات)، حيث يلاحظ أن محتوى معظم العناصر متقاربة (باستثناء بعض الاختلافات البسيطة لبعض العناصر) بين نماذج النوع الواحد المأخوذة خلال فترة النمذجة، حيث أوضحت الدراسة المعدنية والبيروغرافية وجود تشابه في المكونات المعدنية الرئيسية بين نماذج النوع الواحد للنماذج المدروسة وأن الاختلاف هو في نسبة وجود هذه المعادن في المزيج الخام أو الكلنكر أو

الاسمنت، وهذا التقارب يشير الى وجود إستقرار نوعاً ما في المحتوى الكيميائي والمعدني للمزيج الخام وكذلك الاسمنت المنتج في المعمل المدروس. ومن خلال مقارنة المحتوى الكيميائي للنماذج المدروسة ومعدلاتها الموضحة في الجدول (2) مع مواصفات المزيج الخام والكلنكر المقترحة من قبل بعض الباحثين (Ghosh, 1983; Aitcin, 2008; Schorcht, et al., 2013 In: Alsop, 2019) ومواصفات الاسمنت المقترحة من قبل الباحثين (Kohlhaas et al., 1983; Aitcin, 2008) والموضحة في الجدول (4)، تبين أن المحتوى الكيميائي لنماذج المزيج الخام والكلنكر والاسمنت المقاوم يقع ضمن حدود المواصفات المذكورة بإستثناء الزيادة في محتوى الحديد للمزيج الخام والإنحرافات البسيطة في نسبة السليكا والقلويات والحديد للكلنكر ومحتوى CaO للأسمنت يكون أقل من الحد الأدنى المطلوب. ولأن المزيج الخام قيد الدراسة هو لإنتاج الاسمنت المقاوم، لذا تضاف أكاسيد الحديد له أكثر مما في إنتاج الاسمنت الاعتيادي. ومن الجدير ذكره أن الاسمنت المقاوم للكبريتات قيد الدراسة ينتج في معمل الحدياء وفق المتطلبات الكيميائية للمواصفة القياسية العراقية (رقم 5، 1984) والمعدلة لعام 2019 والموضحة في الجدول (5)، وعند مقارنة المحتوى الكيميائي لنماذج الاسمنت بالحدود العليا للمواصفات المطلوبة ولمحتوى (MgO, SO₃, LOI, IR, Cl)، فإنه يكون مطابقاً لحدود هذه المواصفات. وعند مقارنة معدل المحتوى الكيميائي المتوقع للكلنكر والمحسوب من معدل المحتوى الكيميائي للمزيج الخام المدروس والذي تم حسابه حسب الطريقة المعتمدة من قبل (Kohlhaas et al., 1983; Schafer, 1987)، مع معدل المحتوى الكيميائي للكلنكر الفعلي المنتج في المعمل المدروس والموضح في الجدول (6)، يلاحظ أن محتوى بعض العناصر متقاربة وبعضها متباينة بالنقصان مثل (K₂O, CaO) أو بالزيادة مثل (SO₃, Na₂O) بسبب فقدان أو إضافة بعض المكونات خلال عملية الإنتاج من حرق وتبريد.

توضح نتائج حسابات بعض المعاملات للنماذج المدروسة والمذكورة في الجدول (3) أنه لا يوجد تغيير كبير في قيم معظمها خاصة بين نماذج النوع الواحد المأخوذة خلال فترة النمذجة، وهذا يؤكد وجود إستقرار نوعاً ما في محتوى المزيج الخام والاسمنت المنتج في المعمل المدروس.

الجدول 4: مواصفات المحتوى الكيميائي لمزيج المواد الخام وكلنكر الاسمنت والاسمنت المقاوم للكبريتات المقترحة من قبل بعض الباحثين.

Range Constituent wt%	Raw material mix		
	By Ghosh, 1983	By Aitcin, 2008	By Schorcht et al., 2013 In: Alsop, 2019
SiO ₂	—	12 - 16	12 - 16
Al ₂ O ₃	—	3 - 7	2 - 5
Fe ₂ O ₃	—	1 - 3	1.5 - 2.5
CaO	—	40 - 44	40 - 45
MgO	0 - 5	1.5 - 4.5	0.3 - 5
SO ₃	0 - 4	0.3 - 2.7	0 - 1.5
Na ₂ O	—	—	0.1 - 1.5
K ₂ O	—	—	0.1 - 1.5
Na ₂ O+ K ₂ O	0 - 1	0.4 - 1	—
TiO ₂	0 - 4	—	0 - 0.5
MnO	0 - 4	—	0 - 0.5
P ₂ O ₅	0 - 1	—	0 - 0.8
Cl	0 - 0.6	—	0 - 0.3
L.O.I	—	33 - 37	32 - 36

يتبع جدول (4)

Range Constituent wt%	Cement clinker			Portland cement
	By Ghosh, 1983	By Aitcin, 2008	By Schorcht et al., 2013 In: Alsop, 2019	Kohlhaas et al., 1983 and Aitcin, 2008
SiO ₂	21 — 24	14 — 26	—	18 — 24
Al ₂ O ₃	4 — 7	4 — 8	—	4 — 8
Fe ₂ O ₃	2 — 4	1 — 5	—	1 — 8
CaO	63 — 67	57 — 67	—	60 — 69
MgO	5 — 6	2 — 5	—	< 5
SO ₃	1.5 max.	0.3 — 2.7	1.5 max.	< 3
Na ₂ O	—	—	1 max.	—
K ₂ O	—	—	—	—
Na ₂ O+ K ₂ O	1.2 max.	0.4 — 1	—	< 2
TiO ₂	2 max.	—	1 max.	—
MnO	4 max.	—	—	—
P ₂ O ₅	0.5 max.	—	1 max.	—
Cl	—	—	0.03 max.	—
LOI	—	0.1 — 0.5	—	—

الجدول 5: المتطلبات الكيميائية والمعدنية للأسمنت المقاوم للكبريتات حسب المواصفة القياسية العراقية رقم (5).

المواصفة القياسية العراقية رقم (5) المعدلة لسنة 2019	المواصفة القياسية العراقية رقم (5) لسنة 1984	رقم المواصفة وسنة التعديل الخواص (المتطلبات)
-	1.02-0.66	عامل الاشباع الكلسي
5	5	محتوى أكسيد المغنيسيوم % الحد الأعلى
	2.5 2.5	محتوى ثالث أكسيد الكبريت % الحد الأعلى عندما تكون ألومينات ثلاثي الكالسيوم: a- أقل من 5% b- أكثر من 5%
2.5 2.5		محتوى ثالث أكسيد الكبريت % الحد الأعلى عندما تكون ألومينات ثلاثي الكالسيوم: a- أقل من 3.5% b- أكثر من 3.5%
4	4	الفقدان بالحرق % الحد الأعلى
1.5	1.5	المواد المتبقية غير الذائبة % الحد الأعلى
0.1	-	محتوى الكلوريد % الحد الأعلى
3.5	3.5	محتوى ألومينات ثلاثي الكالسيوم % الحد الأعلى
(-) تعني غير محدد في المواصفة.		

الجدول 6: معدل محتوى أكاسيد العناصر الرئيسية (wt%) لمزيج المواد الخام وكلنكر الأسمنت المدروس وكذلك الكلنكر المتوقع والمحسوب نظرياً من مزيج المواد الخام قيد الدراسة، وكذلك قيم عامل الإشباع الكلسي لهم.

Constituent wt%	A raw mix of the current study (average)	Expected cement clinker (Calculated from the raw mix) (average)	Cement clinker of the current study (average)
SiO ₂	13.01	19.94	19.96
Al ₂ O ₃	3.68	5.64	5.67
Fe ₂ O ₃	3.85	5.90	6.10
CaO	40.53	62.10	60.55
MgO	2.36	3.62	3.85
SO ₃	0.50	0.77	1.19
Na ₂ O	0.52	0.80	0.99
K ₂ O	0.35	0.54	0.44
TiO ₂	0.27	0.41	0.36
MnO	0.14	0.21	0.25
P ₂ O ₅	0.04	0.06	0.06
Cl	0.01	0.01	0.01
LOI	34.74	0	0.57
Total	100	100	100
LSF %	101.8	101.8	99.7

حدد (Kohlhaas et al., 1983) قيمة LSF للمزيج والكلنكر بين 90-102%، بينما حددت المواصفة القياسية العراقية (رقم 5، 1984) والموضحة في الجدول (5) قيمته للأسمنت بين 66-102%. لذا نلاحظ أن قيمة هذا المعامل للنماذج المدروسة والموضحة في الجدول (3) هي ضمن الحدود المطلوبة للمواصفات المذكورة. كما أن قيمة LSF للكلنكر المتوقع المحسوب نظرياً من المزيج الخام قيد الدراسة والموضحة في الجدول (6) هي أيضاً ضمن حدود المواصفات المذكورة آنفاً (90-102%).

وأشار (Duda, 1984) إلى أن قيم معامل السليكا يجب أن تكون 1-2 كحد أدنى وأن قيم معامل الألومينا يجب أن تكون 0.7 كحد أدنى في حالة إنتاج الأسمنت المقاوم للكبريتات. وبمقارنة نتائج النماذج المدروسة بالحدود المذكورة، فإن معامل السليكا يكون أقل من الحد المطلوب بفارق قليل، أما معامل الألومينا فيكون مطابقاً للحد المذكور.

حدد عدد من الباحثين (Schafer, 1987; ASTM C150, 2007; Hewlett and Liska, 2019) بأن لا تتجاوز قيم مكافئ القلويات عن 0.6% لتجنب مخاطر زيادة القلويات في الأسمنت والتي أشرنا إليها آنفاً. وحدد (Aitcin, 2008) نسبة الطور السائل بين 20-28%، لذا فإن قيم هذين المعاملين للنماذج المدروسة تكون غير مطابقة لهذه المواصفات المذكورة.

يوضح الجدول (3) والمذكور آنفاً، نتائج حسابات محتوى الأطوار المعدنية الرئيسية لنماذج الكلنكر والأسمنت المقاوم للكبريتات المدروسة والمحسوبة من التحليل الكيميائي حسب معادلات Bogue المذكورة آنفاً، ويلاحظ وجود تباين قليل في محتوى هذه الأطوار بين نماذج الكلنكر وبين نماذج الأسمنت المدروسة، وهذا يشير إلى الإستقرار النسبي في إنتاج الأسمنت في المعمل المدروس. حدد العديد من الباحثين مواصفات لمحتوى هذه الأطوار في الأسمنت الاعتيادي إلا أنها لا تتوافق مع نماذج دراستنا الحالية لكون أن الأسمنت قيد الدراسة هو أسمنت مقاوم للكبريتات. وحددت المواصفة القياسية العراقية (رقم 5، 1984) والمعدلة 2019 والموضحة في الجدول (5) نسبة طور C3A فقط في الأسمنت المقاوم ألا يزيد عن 3.5% ولم تحدد الأطوار الأخرى، لذا فإن نتائج حساب هذا الطور لنماذج الأسمنت المدروسة والموضحة في الجدول (3) غير مطابقة للمواصفات المذكورة.

الإستنتاجات

أوضحت الدراسة المعدنية لنماذج الدراسة الحالية عدم وجود تغير كبير في المحتوى المعدني بين نماذج النوع الواحد المأخوذة خلال فترة النمذجة، وأن المحتوى المعدني للنماذج الكلية متشابه، والإختلاف هو فقط في

نسبة وجود المعادن الرئيسية في نماذج المزيج الخام أو الأطوار المعدنية الرئيسية وأنواعها الموجودة في نماذج الكلنكر والأسمنت المقاوم للكبريتات. وأشارت الدراسة البتروغرافية أن نماذج الكلنكر متشابهة من حيث نوع وشكل الأطوار المعدنية السائدة وتباين في نسبة وجودها وحجم وشكل وتوزيع بلورات أطوار المعادن السليكاتية (الألايت والبيلايت).

وبينت الدراسة الكيميائية من خلال تحليل العناصر الرئيسية والثانوية للنماذج المدروسة وجود تقارب في محتوى هذه العناصر بين نماذج النوع الواحد، مما يشير إلى وجود إستقرار نوعاً ما في محتوى المزيج الخام والأسمنت المنتج. وأن محتوى معظم العناصر الرئيسية والثانوية ومعدلاتها مطابقة لحدود المواصفات المذكورة من قبل بعض الباحثين بإستثناء بعض الانحرافات البسيطة في بعض المكونات. كما أن نتائج التحليل الكيميائي لنماذج الأسمنت المدروسة مطابقة لحدود المتطلبات الكيميائية للمواصفة القياسية العراقية (رقم 5، 1984) والمعدلة لعام 2019. أما نتائج حسابات بعض المعاملات LQP, AEQ, AM, SM, LSF المحسوبة من التحليل الكيميائي للنماذج المدروسة تُظهر عدم وجود تغيير كبير في قيم هذه المعاملات بين نماذج النوع الواحد، وهذا يؤكد الإستقرار النسبي في محتوى مزيج المواد الخام والأسمنت المقاوم للكبريتات المنتج في المعمل المدروس. وكذلك فإن نتائج حسابات محتوى الأطوار المعدنية الرئيسية المحسوبة من التحليل الكيميائي حسب معادلات Bogue لنماذج الكلنكر والأسمنت المقاوم فهي متقاربة وتباين قليل بين نماذج النوع الواحد. وأن محتوى طور C_3A غير مطابق للمواصفات المطلوبة في المواصفة العراقية رقم (5).

المصادر العربية

- إنجازات، منشور معاونيه السمنت الشمالية، 2019. الشركة العامة للسمنت العراقية/ وزارة الصناعة والمعادن. الدليل الإسترشادي المرجعي رقم 472، 1993. طرق التحاليل الكيميائية للأسمنت البورتلندي. الجهاز المركزي للتقييس والسيطرة النوعية، وزارة التخطيط، 22 ص.
- الشريفي، راشد عبد راشد، 2013. التوزيع الجغرافي لإنتاج واستهلاك الطاقة الكهربائية في العراق. أطروحة دكتوراه غير منشورة، جامعة البصرة/العراق، 405 ص.
- العجيل، عبد الوهاب عبد الرزاق وحمودي، نوفل عبد الرسول، 1990. دراسة إمكانية تركيز مخلفات خام حديد الحسنيات لاستخدامه في صناعة الاسمنت. دائرة المختبرات الكيميائية والتقييم المعدني/ هيئة المسح الجيولوجي العراقية/ وزارة الصناعة والمعادن، 38 ص.
- المواصفة القياسية العراقية رقم 5، 1984. السمنت البورتلندي، الجهاز المركزي للتقييس والسيطرة النوعية، وزارة التخطيط، 10 ص.
- المواصفة القياسية العراقية رقم 5 المعدلة، 2019. السمنت البورتلندي، الجهاز المركزي للتقييس والسيطرة النوعية، وزارة التخطيط، 10 ص.
- كلي، أمير حيدر، 2006. طبيعة إنتشار السليكا في المواد الخام الأولية لمقالع معمل أسمنت حمام العليل وتقييم المواد الخام الأولية في المواقع البديلة. رسالة ماجستير غير منشورة، جامعة الموصل/العراق، 136 ص.

المصادر الأجنبية

- Aitcin, P. C., 2008. Binders for durable and sustainable concrete. Modern Concrete Technology Series 16, Taylor and Francis Group, 500p.
- Aitcin, P. C. and Flatt, R. J., 2016. Science and technology of concrete admixtures. Woodhead Publishing, Elsevier Ltd., 613p.
- Alsop, P. A., 2019. The Cement Plant Operations Handbook for Dry-process Plants: The Concise Guide to Cement Manufacture. 7th ed., Trade ship Publications Limited, 338p.
- ASTM C150, 2007. Standard Specification for Portland cement. ASTM International, 8p.

- ASTM D1756, 2002. Standard Test Method for Determination as Carbon Dioxide of Carbonate Carbon in Coal. ASTM International, 3p.
- Barnes, P. and Bensted, J., 2002. Structure and performance of cements. 2nd ed., Spon Press, 565p.
- Brindley, G. w. and Brown, G., 1980. Crystal structure of clay minerals and their X-ray identification Mineralogical Society, Monograph. London, 495p.
- Campbell, D. H., 1999. Microscopical examination and interpretation of Portland cement and clinker. 2nd ed., Portland Cement Association, 201p.
- Chatterjee, A. K., 2018. Cement production technology: Principles and practice. Taylor and Francis Group, LLC, 419p.
- Duda, W. H., 1977. Cement-Data-Book, International process engineering in the cement industry. 2nd ed., Bauverlag, GmbH. Wiesbaden and Berlin, Macdonald and Evans, 539p.
- Duda, W. H., 1984. Cement-data-book: Electrical engineering, automation, storage, transportation, dispatch. Vol. 2, 1st ed., Bauverlag, GmbH, 456p.
- Duggal, S. K., 2008. Building Material. New age international Ltd., 525p.
- Ghosh, S. N., 1983. Advances in cement technology: critical reviews and case studies on manufacturing, quality control, optimization and use. Pergamon Press., 800p.
- Gouda, G. R., 1977. Cement Raw Materials: Their Effect on Fuel Consumption, Rock Products. pp. 60-64.
- Hewlett, P. and Liska, M., 2019. Lea's chemistry of cement and concrete. 5th ed., Butterworth-Heinemann, Elsevier Ltd., 858p.
- Highway Research Board, 1972. Guide to Compounds of Interest in Cement and Concrete Research. 54p.
- Hutchison, C. S., 1974. Laboratory Handbook of petrographic techniques. John Wiley and Sons, New York, 527p.
- Jefferson, D. P., 1983. Determination and proving of raw cement materials. In: Atkinson, K. and Brassington, R., Prospecting and evaluation of non-metallic rocks and minerals. Institution of Geologists, pp. 189-208.
- Kohlhaas, B. A., Binder, U., Bomke, E., Funk, G., Klein-Albenhausen, H. K., Knofel, D., Mechtold, F., Opitz, D., Schafer, G., Schafer, H. U., Schmidt, D., Schmiedgen, G., Schneider, A., Schuberth, H., Schwake, P., SteinbiB, E. and Xeller, H., 1983. Cement engineer's handbook. Fourth English edition, originated by Otto Labahn, translated by C. Van Amerongen from the sixth German edition, Bauverlag GmbH, Wiesbaden and Berlin, 800p.
- Kosmatka, S. H. and Wilson, M., 2011. Design and Control of Concrete Mixtures: The Guide to Applications, Methods, and Materials. 15th ed., Portland cement Association, 444p.

- Lea, F. M., 1956. The chemistry of cement and concrete. 2nd ed., Edward Arnold (Publishers) LTD., 637p.
- Lea, F. M., 1970. The Chemistry of Cement and Concrete. Chemical publishing comp. Inc., Third Ed., New York, 727p.
- Nelson, E. B. and Guillot, D., 2006. Well Cementing. 2nd ed., Schlumberger, 773p.
- Neville, A. M., 2011. Properties of concrete. 5th ed., Pearson Education Limited, 954p.
- Rahman, R. O. A., Rakhimov, R. Z., Rakhimova, N. R. and Ojovan, M. I., 2015. Cementitious materials for nuclear waste immobilization. John Wiley and Sons, LTD., 231p.
- Schafer, H. U., 1987. Assessment of raw materials for the cement industry. Reprint from the journal "World Cement", Cement and Concrete Association, London, No. 7, pp. 273-283.
- Soroka, I., 1979. Portland Cement Paste and Concrete. Macmillan Press Ltd., 338p.
- Shetty, M. S. and Jain, A. K., 2019. Concrete Technology (Theory and Practice). 8th ed., S. Chand and Company Limited, 636p.
- Taylor, H. F. W., 1997. Cement chemistry. 2nd ed., Thomas Telford Services, Ltd., 459p.
- Xincheng, P., 2013. Super-high-strength high-performance concrete. Taylor and Francis Group, LLC, 241p.

Electric sites as References

<https://goo.gl/maps/Ci7VZQkoggbSaLRj8>