الجيوبولمر من أساس الغضار المكلسن كمحسن غير تقليدي وتأثيره على خواص الانتفاخ والانكماش في التربة الغضارية الانتفاخية

د.م عارف السويداني– كلية الهندسة – الجامعة العربية الدولية– a-swaidani@aiu.edu.sy
د.م إبراهيم حمود – كلية الهندسة – الجامعة العربية الدولية – Hammoud1164@aiu.edu.sy
د.م أيمن المذيب– كلية الهندسة – الجامعة العربية الدولية – a-mazyab@aiu.edu.sy

الموجز:

ظهر الجيوبولمر مؤخراً (ويعرف أيضاً بالسلاسل اللاعضوية)، كبديل محتمل لمادة الاسمنت البورتلاندي، من خلال تحويل المواد الطبيعية أو المنتجات الثانوية للصناعة(خبث الأفران، الرماد المتطاير، هباب السيليكا...) ، كمصدر لسيليكات الألمنيوم إلى مواد تمتلك خواص رابطة، وذلك باستخدام المحرضات القلوية. يسعى هذا البحث إلى الوصول الى سلاسل غير عضوية، من خلال التفعيل القلوي، لمواد طبيعية كمصدر لسيليكات الألمنيوم بحالتها اللابلورية (amorphous)، وقد تم في هذا البحث اختيار الغضار المكلسن كأساس (precursor) لهذه السلسلة. يقصد بالغضار المكلسن، الغضار المعالج حرارياً إلى درجات حرارة مرتفعة ولكن دون درجة الانصهار. تم إنتاج الجيوبولمر من أساس الغضار المكلسن كمصدر طبيعي للسليكا والألومينا اللابلورية، بإضافة محلول (ماءات الصوديوم مع سيليكات الصوديوم) إلى الغضار المكلسن مع المعالجة الحرارية. وقد تم تحضير الجيوبولمر في المخبر، وكانت النسبة التي تم اختيارها بين المحرض القلوي (alkaline activator) (Na_2SiO_3 + NaOH) إلى محسن التربة المقترح (غضار مكلسن) والذي يمثل أساس الجيوبولمر هي (0.85). نسب المحسن إلى التربة (5, 10, 15%)، الرطوبة التي يضاف فيها الجيوبولمر إلى التربة هي الرطوبة القريبة من حد السيولة(LL) للتربة بدون إضافات وتحديداً (LL-5%). وتم تحضير المحرض القلوي من NaOH و Na_2SiO_3 بالنسب Na_2SiO_3 / NaOH =2.5.

بينت نتائج التجارب التي أجريت على عينات التربة الغضارية المحسنة بالجيوبولمر تحسناً كبيراً في خواص الانكماش الخطي، الذي انعدمت قيمته عند إضافة نسبة 15% من الجيوبولمر إلى التربة الغضارية وتقيد هذا الانكماش بشكل أقل عند إضافة النسبتين 10% و5% على الترتيب. وكذلك خواص الانتفاخ (انتفاخ نسبي وضغط انتفاخ) فقد تقيدت أيضاً بشكل كامل عند إضافة النسبة 15% من الجيوبولمر وبشكل أقل عند النسبتين 10% و5% على الترتيب. في دلالة واضحة على فعالية الجيوبولمر من أساس الغضار المكلسن في تحسين خواص الانتفاخ والانكماش للتربة الغضارية الانتفاخية.

كلمات مفتاحية:

الترب الغضارية الانتفاخية، الجيوبولمر، التفعيل القلوي، الغضار المكلسن، الانكماش الخطي، الانتفاخ النسبي، ضغط الانتفاخ.

Geopolymer based on Calcined clay as untraditional stabilizer and its influence on swelling and shrinkage properties of expansive clayey soil

Dr. Aref ALSWIDANI. Faculty of Engineering, Arab International University a-swaidani@aiu.edu.sy.
Dr. Ibrahim HAMMOUD. Faculty of Engineering, Arab International University, Hammoud1164@ aiu.edu.sy
Dr . Ayman MEZIAB. Faculty of Engineering, Arab International University, a-mazyab @ aiu.edu.sy.

Abstract

Recently, geopolymer (inorganic series material) emerge as substantial material of Portland cement, through convert natural or by-product materials such as furnace slug, fly ash, silica fume, as a resource of aluminosilicates to materials possess bonding properties, by using alkaline activators.

This research try to acquire inorganic series based on natural materials as a resource of aluminosilicates in its amorphous phase, for this purpose, calcined clay was chosen as a precursor of this series. When we say calcined clay, we mean clay that thermally treated at high temperatures but less than fusion limit.

Geopolymer based on calcined clay as a resource of amorphous aluminosilicates, was produced by adding an alkaline solution consists of sodium hydroxide and sodium silicate to calcined clay with thermally treatment. And the geopolymer was prepared in the laboratory, the ratio between alkaline activator (Na_2SiO_3+NaOH) to proposed soil stabilizer was equals to (0.85). the ratios of stabilizer to soil were (5,10,15%) as a percent of dry weight , and the moisture content in which the geopolymer added to soil was closed to liquid limit (LL) of mother soil and precisely (LL-5%). While the alkaline

activator from Na_2SiO_3 and NaOH was prepared in the ratio Na_2SiO_3 / NaOH = 2.5.

The results of experiments on samples of clayey soil stabilized by geopolymer, showed an extremely enhancement in the properties of linear shrinkage, and the value of linear shrinkage was cessed to zero when geopolymer was added at the ratio 15% to expansive clayey soil, while the linear shrinkage was restricted to lower levels when geopolymer was added at 10% and 5% respectively.

In a similar manner, the values of relative swelling and swelling pressure reduced to zero value when the ratio of 15% of geopolymer was added to the expansive soil, while this restriction was less at ratios of 10% and 5% respectively.

That is a clear indicator to the high efficiency of adding the geopolymer based on calcined clay, on restriction the phenomena of swelling and shrinkage of expansive clayey soil.

Key words:
Expansive clayey soil, geopolymer, alkaline activator, calcined clay, linear shrinkage, free swelling, pressure of swelling.

1- مقدمة:

إن الاستخدام الآمن للمصادر الطبيعية، أصبح اليوم من الحاجات التي يفرضها، الواقع المستنزف لهذه المصادر، هذا بالإضافة إلى أن انبعاثات غازات الدفيئة، تنذر بنتائج سلبية جداً على الحياة على الكوكب الأزرق. ومع الحاجة إلى تحسين التربة الغضارية الانتفاخية، يجري الباحثون محاولات حثيثة للمقاربة بين التحسين المطلوب للترب الغضارية الانتفاخية، التي تصادف في أساسات الأبنية والطرق، وبين الحفاظ على الموارد الطبيعية، لذلك تظهر اليوم أبحاث كثيرة تعنى بالاستغلال الأمثل لهذه الموارد الطبيعية

ومن بين المقاربات التي سعى الباحثون للتوصل إليها هو مادة رابطة عالية الكفاءة وبنفس الوقت صديقة للبيئة ومن هنا توجهت جهود كثير من الباحثين إلى الجيوبولمر، كطريقة واجراء يمكن أن يحقق في آن معاً، الكفاءة والأمان وذلك من ناحية التأثير على البيئة. الجيوبولمر هو مركب ذو وزن جزيئي مرتفع، مكون من وحدات جزيئية مكررة، وهي مقاومة للحرارة المرتفعة، وأكثر مقاومة للمواد الكيميائية. للجيوبولمر مكونين أساسيين اثنين: مادة صلبة تفاعلية والتي تحتوي على السيليكون وأوكسيد الألمنيوم، ومحلول تفاعل (أساسي) من هيدروكسيدات قلوية وسيليكات قلوية في الماء، كما أن المادة الصلبة هي حجر طبيعي أو معدني وهذا هو المغزى من البادئة "جيو"[6-1].

وقد تبلور مفهوم الجيوبولمر كعملية لبلمرة المواد اللاعضوية (استنساخ سلاسل من مواد معدنية)، وذلك عندما أطلق الباحث الفرنسي جوزيف دافيدوفيتس (Joseph Davidovits) [7] هذا الاسم على عملية إنتاج سلاسل لاعضوية من جزيئات السيليكا والألومينا.

وظهر الجيوبولمر مؤخراً (ويعرف أيضاً بالسلاسل اللاعضوية)، كبديل محتمل لمادة الاسمنت البورتلاندي، من خلال تحويل المحسنات أو المنتجات الثانوية للصناعة، كمصدر لسيليكات الألمنيوم (خبث الأفران، الرماد المتطاير، هباب السيليكا...) إلى مواد تمتلك خواص رابطة، كقيمة مضافة، وذلك باستخدام المحرضات القلوية[8].

وقد تطور هذا المفهوم ليصبح مجالاً مفتوحاً للباحثين عن مواد ذات خواص رابطة، صديقة للبيئة بعيداً عن سلبيات صناعة الاسمنت. لذلك كان التحدي في الوصول إلى ايجابيات الاسمنت كمادة رابطة فعالة، حيث يكفي إضافة الماء إلى الاسمنت للحصول على مادة تمتلك بعد تصلبها خواص الحجر (like-stone material)، وحاول الباحثون الوصول إلى مقاربات تفضي إلى مواد /غير الاسمنت/ تعطي خواصاً رابطةً عند إضافة الماء إليها، وأطلقوا على السلاسل التي حصلوا عليها اسم جيوبولمر الجزء الواحد (one-part geoplymer) وأطلقوا شعار أضف الماء فقط (just add water ...)، حيث يتم في هذه العملية الخلط الجاف بين المحرض القلوي مع الأساس من الألومينوسيليكات مع أو بدون خطوة المعالجة الحرارية [9]. وهذا النوع من الجيوبولمر ليس هو المقصود في هذا البحث.

الجيوبولمر المقصود في هذا البحث يمكن الحصول عليه من خلال ثلاث خطوات مقترحة:

1- انحلال للمادة التي تحتوي على سيليكات الألمنيوم اللابلورية في المحلول القلوي.

2- إعادة تنظيم وتوزيع الذرات المتشردة (الأيونات) المترافق مع تشكل بنية من خثرات صغيرة متكاثفة.

3- تشكل سلاسل تكاثفية (polycondensation) من المادة المنحلة والتي كانت على شكل خثرات لتشكيل مركبات مائية (hydrated product) **[10]**.

وعموماً يتأثر الجيوبولمر كعملية اجرائية بعدة عوامل، منها نسبة Al_2O_3/SiO_2، وتركيز المادة القلوية ودرجة حرارة الانضاج و زمن الانضاج ونسبة الماء إلى المادة الصلبة والرقم الهيدروجيني (PH) وأخيراً الطاقة الحرارية [11].

2- الأهداف والدوافع:

يسعى هذا البحث إلى الوصول الى سلاسل غير عضوية، من خلال التفعيل القلوي، لمواد طبيعية كمصدر لسيليكات الألمنيوم بحالتها اللابلورية (amorphous)، وقد تم اختيار الغضار المكلسن كأساس (precursor) لهذه السلسلة.

الغضار المكلسن كناتج للمعالجة الحرارية للتربة الغضارية، كان مجال بحث موسع توصل فيه الباحثون(AL-Swaidani et al-2018) [12] إلى امكانية استخدامه كمادة تحسين لخواص التربة الغضارية الأم، عن طريق المعالجة الحرارية بدرجة حرارة عالية، لكن دون الانصهار، مما شكل دافعاً لهذا البحث، حيث من الممكن كلسنة التربة الغضارية وزيادة التفعيل من خلال اللجوء إلى إنتاج سلاسل لاعضوية بالمعالجة القلوية باستخدام محرضات قلوية مركبة من ماءات الصوديوم وسيليكات الصوديوم.

3- المواد :Materials

3-1 التربة الغضارية:

التربة الغضارية التي تم اختيارها في البحث، تم اعتيانها من منطقة الشيخ مسكين. أعماق الاعتيان تراوحت بين 1- 1.5m. يبين الجدول التالي مواصفات التربة الغضارية.

الجدول رقم (1) مواصفات التربة الغضارية قبل المعالجة

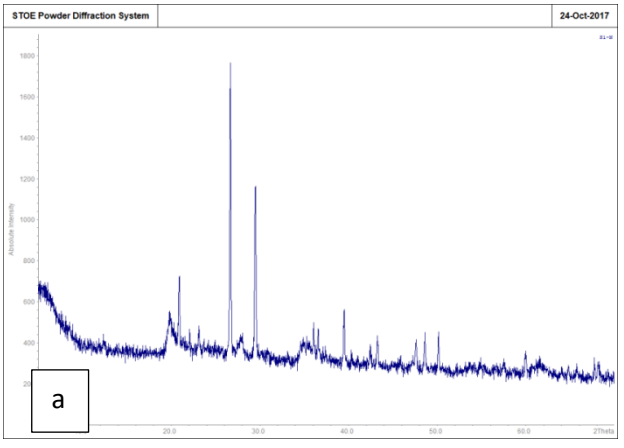
الاختبار	التربة الغضارية الثانية (الشيخ مسكين)
العمق	1-1.5m
الرطوبة الطبيعية	18%
خواص الرص (بروكتور النظامي): الكثافة الجافة العظمى MDD الرطوبة المثالية OMC	 1.52 19%
خواص القوام (حدود اتربرغ): حد السيولة (LL) حد اللدونة (PL) قرينة اللدونة (PI)	 58% 27% 31%
مقاومة الضغط غير المحصور وفق محور واحد (UCS)	282 KPa
نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR) عينات مغمورة بالماء لمدة 96 ساعة عينات غير مغمورة بالماء	 3.85 7.45

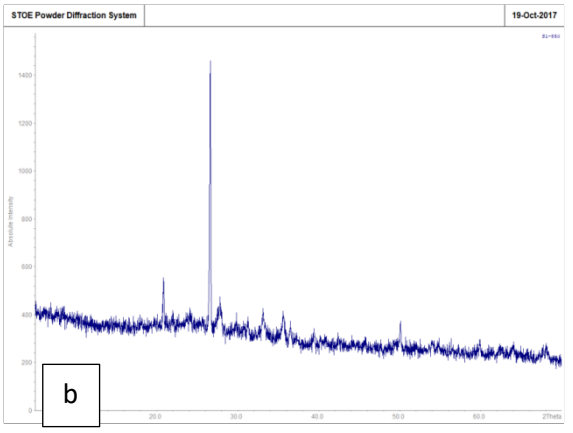
2-3 الغضار المكلسن calcined clay:

يقصد بالغضار المكلسن، الغضار المعالج حرارياً إلى درجات حرارة مرتفعة ولكن دون درجة الانصهار، وقد استخدمت هذه المادة بشكلها المعالج قديماً كمادة بناء، في انتاج أحجار البناء أو ما يسمى بالطوب، ويعد استخدام المعالجة الحرارية لتحسين خواص التربة الغضارية من الوسائل التي استخدمت بشكل نمطي ولأغراض محددة وضيقة[13]، إلا أن الغضار المكلسن شائع الاستخدام كبديل جزئي للاسمنت، بسبب الخواص الرابطة التي أظهرتها الاختبارات والتجارب التي أجريت على المادة بعد المعالجة [13]

إن تسخين الغضار إلى درجة حرارة معينة، يتوقع منه أن يؤدي إلى التخلص من الماء المرتبط كيميائياً ضمن شبكة بلورات الغضار، أو ما يسمى بالماء البنيوي (structural water)، بعملية تعرف بنزع الماء البنيوي (dehydroxilation)، حيث أن مجموعات الـ (OH) تشكل جزءاً من طبقة البلورات ثمانية الوجوه، وتربطها بطبقة البلورات رباعية الوجوه.[14]

إنَّ التخلص من مجموعات الـ (OH) يقود إلى حالة من عدم الانتظام في البنية البلورية وتحول المادة إلى حالة انتقالية أو ما يسمى مرحلة ما بعد الاستقرار (metastable). ومن هنا يأتي تعبير (metakaolenite) ميتاكاولينيت والذي يشير إلى فلز الكاولينيت الذي تم تسخينه من أجل كسر الانتظام البنيوي للبلورات[15].





الشكل رقم (1) تطور الطور الزجاجي للغضار قبل وبعد الكلسنة (المعالجة الحرارية) وفق اختبار الـXRD

a- طيف XRD للغضار قبل الكلسنة b- طيف XRD للغضار بعد الكلسنة

يبين الشكل (1) تطور الطور الزجاجي للغضار المستخدم في هذا البحث، قبل الكلسنة وبعدها، حيث يلاحظ اختفاء القمم المعبرة عن البلورات التي تشكل بنية المادة، أو تقلص شدة وميض الأشعة السينية (XRD) لقمم أخرى أكثر انتظاماً، حيث أنه من المعلوم أن الأشعة السينية لا تعطي أثراً على شكل قمم/بيكات إلا عند تشتتها عند مصادفتها للبلورات التي تتشكل منها بنية المادة، كما أن شدة الوميض تدل على مدى انتظام البنية البلورية [15].

وبالنتيجة فإن المعالجة الحرارية للغضار أعطت النتيجة المطلوبة في زيادة الطور الزجاجي / اللابلوري وتقليص الطور البلوري، وبذلك تصبح المادة أكثر تفاعلاً مع وسطها الذي توجد فيه. حيث يمثل الغضار المكلسن (الألومينوسيليكات اللابلورية) الأساس الذي سيبنى عليه تشكيل سلاسل الجيوبولمر.

3-3 المحرض القلوي alkaline activator:

إن من أشهر المركبات القلوية المستخدمة في عملية التفعيل القلوي، مركبات الصوديوم لأسباب تتعلق بوفرتها وسهولة الحصول على مركباتها، التي يمكن بدايةً استخلاصها من ماء البحر، أي كلور الصوديوم (NaCl) والذي يمكن تحويله إلى كربونات الصوديوم ($NaCO_3$) ومن ثم إلى سيليكات الصوديوم(Na_2SiO3) عبر المعالجة الحرارية، أو يمكن تحويل كلور الصوديوم إلى ماءات الصوديوم (NaOH) [16].

تمَّ في هذا البحث استخدام مزيج من مركبي كلور الصوديوم (NaOH) وسيليكات الصوديوم (Na_2SiO3) المخبرية وذلك لزيادة فعالية التحريض القلوي وكخطوة للحصول على الجيوبولمر، خواص المركبين بنقاوة مخبرية.

4-3 الجيوبولمر(geopolymer):

تم إنتاج الجيوبولمر من أساس الغضار المكلسن كمصدر طبيعي للسيليكا والألومينا اللابلورية، بإضافة محلول المحرض القلوي (ماءات الصوديوم مع سيليكات الصوديوم) إلى الغضار المكلسن مع المعالجة الحرارية، وتم أخذ عينات من المركب الناتج وانضاجه لمدة 7 أيام في جو المخبر للحصول على عينات تصلح لاختبارات الـ SEM

والـ EDX ، ويعتمد تحليل(EDX) Energy-Dispersive X-ray على مبدأ أن الذرات الموجودة على سطح العينة المدروسة والمحرضة بواسطة حزمة الالكترونات، تبث أشعة سينية ذات طول موجي محدد، والتي تعد سمة محددة لبنية الذرة للعناصر المدروسة، حيث يتمكن مشعر يستقبل الطاقة المتبددة Dispersive Energy من تحليل إصدارات الأشعة السينية وتحديد العنصر الكيميائي نوعياً وكمياً [17].

4- الدراسة التجريبية:

بداية كان لا بد من اجراء اختبارات المواد على الجيوبولمر الذي تم الحصول عليه من أساس الغضار المكلسن وفق ما موصوف في الفقرة 3-4 وذلك لإثبات كفاءة المنتج الذي سيعمل كمادة رابطة بين حبيبات التربة المستهدفة بالتحسين. وهذه الاختبارات هي اختبار عينات من الجيوبولمر منضجة لمدة 7 أيام في جو المخبر على المجهر الالكتروني الماسح (SEM) واختبار الـ (EDX) لنفس العينات، وهي تمثل المرحلة الأولى من الدراسة التجريبية.

أما المرحلة الثانية فتتضمن إجراء اختبارات القوام، الانكماش والانتفاخ، وذلك على التربة والتربة مع الإضافة (الجيوبولمر من أساس الغضار المكلسن)، ومقارنة النتائج مع العينة المرجعية من التربة الغضارية غير المعالجة، ومن ثمَّ مناقشة هذه النتائج وصولاً إلى الاستنتاجات والتوصيات.

تمّ تحضير تركيبات مزجية من التربة الغضارية و محلول الجيوبولمر، بنسبة إضافة من الجيوبولمر هي (5, 10, 15%) كنسبة من وزن الغضار المكلسن الجاف الداخل في تركيب محلول الجيوبولمر، إلى وزن التربة الجاف، أما الماء الذي يشكل وسط المحلول فتم احتسابه ضمن رطوبة التشكيل المقترحة في هذا البحث وهي أقل من حد السيولة بـ 5% ووفق ما هو موضح في الجدول رقم (2) أما التجارب التي تمّ إجراؤها على مواد الإضافة والتربة والتركيبات المزجية، فكانت على الشكل التالي:

- تجربة حدود اتربرغ للتربة والتربة مع الإضافة (حد السيولة، حد اللدونة، قرينة اللدونة)، وفق المواصفة (ASTM D 4318-93)

- **تجربة الانكماش الخطي للتربة والتربة مع الإضافة وفق المواصفة البريطانية** (BS 137).
- **تجربة الانتفاخ الحر للتربة والتربة مع الإضافة وفق المواصفة** (ASTM D-4645, 2435 .

الجدول رقم(2) نسب خلط الإضافة إلى التربة (كتلة/كتلة)

التسمية	التربة (%)	الجيوبولمر(GP) (%)
G5[1]	95	5
G10	90	10
G15	85	15

5-النتائج والمناقشة:

5-1 تحضير الجيوبولمر والاختبارات التي تمت عليه:

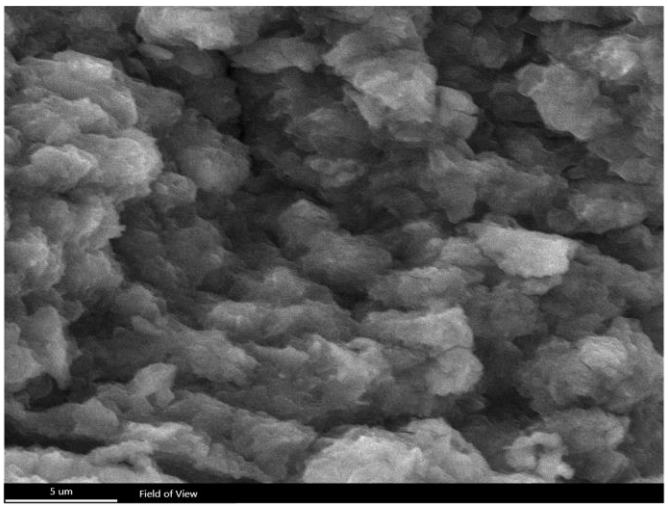
تم تحضير الجيوبولمر في المخبر، وكانت النسبة التي تم اختيارها بين المحرض القلوي (alkaline activator) **والمكون من** (Na_2SiO_3 + NaOH) **إلى محسن التربة المقترح (غضار مكلسن) والذي يمثل أساس الجيوبولمر هي (0.85).**

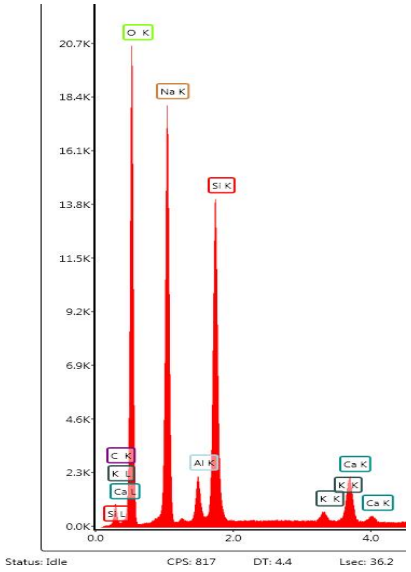
نسب إضافة المحسن إلى التربة (5, 10, 15%)، الرطوبة التي يضاف فيها المحسن مع المحرض إلى التربة هي الرطوبة القريبة من حد السيولة(LL) **للتربة بدون إضافات وتحديداً** (LL-5%). **حيث تم تحضير محلول** NaOH **قبل 24 ساعة من المزج مع المحسن. وتم تحضير المركب القلوي (المحرض القلوي) من** NaOH **و** Na_2SiO_3 **بالنسب** Na_2SiO_3 / NaOH =2.5 **وزناً وذلك بإضافة** NaOH **إلى** Na_2SiO_3 **ثم يترك المزيج لمدة** 24h **في الفرن بدرجة حرارة** 80 °C منها 1 ساعة في جو المخبر للخلط بواسطة الـ stirrer (مغناطيس) بدرجة حرارة 80 °C وذلك لضمان المزج المتجانس للمركب أو المحرض القلوي . **تركيز** NaOH هو 10M وعند تحضير

G5: stands for Geopolymer added at 5% (by weight) to soil

NaOH من المادة الأساسية على شكل أقراص نتجنب إضافة الماء إلى الأقراص، وإنما نأخذ جزء من الماء ونضعه في بيشر ثم نضيف الأقراص بحذر، بعد ذلك نضيف بقية الكمية من الماء للوصول إلى 1ليتر بحذر وكل ذلك يتم تحت الساحبة.

يتم بعد ذلك إضافة محلول المحرض القلوي إلى الغضار المكلسن (CC) الذي يشكل أساس الجيوبولمر بنسبة مزج (activator/CC = 0.85) ويتم المزج إما بالخلاط الميكانيكي أو يدوياً لمدة 10 دقائق على الأقل. حتى الحصول على عجينة متجانسة





الشكل رقم (2) صورة المجهر الالكتروني الماسح (SEM) وتحليل الـ (EDX) لعينة الجيوبولمر المحضرة مخبرياً مع انضاج 7 أيام

يبين الشكل (2) صورة بالمجهر الالكتروني المسحي (SEM) لعينة من الجيوبولمر الذي تم تحضيره كما هو موصوف أعلاه. مع تحليل(EDX) لنفس العينة تظهر سيادة عنصر الصوديوم Na والسيليكون Si والألمنيوم Al، أما صورة الـ SEM . فيظهر فيها انتظام البنية الميكروية للعينة مما يدل على الوصول إلى الغاية المرجوة من التفعيل القلوي وإنتاج سلاسل الجيوبولمر.

2-5 خواص القوام (حدود اتربرغ) : ASTM-D4318-93

بينت تجارب حدود اتربرغ (حد السيولة وحد اللدونة) التي أجريت على التربة الغضارية ، والتربة مع الإضافات، في هذا البحث، أنّ إضافة الجيوبولمر من أساس الغضار المكلسن، بكل النسب المقترحة في هذا البحث (5- 10- 15%) أدى إلى زيادة ملحوظة في حد اللدونة ونقصان في حد السيولة، وبالتالي أدى إلى نقصان قرينة اللدونة، وهذا دليل على التحسن الذي طرأ على التربة الغضارية المحسنة، انخفاض قرينة اللدونة يعبر عن ارتفاع قابلية التشغيل للتربة، وتغير التركيب الحبي لها. قيم حد السيولة وحد اللدونة و قرينة اللدونة مبينة في الجدول(5-2). كما يبين الشكل (5-2) قيم قرينة اللدونة مقابل نسب الإضافة من الجيوبولمر من أساس الغضار المكلسن.

الجدول رقم (3) قيم حد السيولة، حد اللدونة، و قرينة اللدونة مقابل نسب الإضافة من الجيوبولمر من أساس الغضار المكلسن.

العينة	الرمز	حد السيولة(%)	حد اللدونة(%)	قرينة اللدونة PI(%)
1	G-0 (ref)	58	27	31
2	G-5	51.8	34.6	17.2
3	G-10	47.6	38.4	9.2
4	G-15	43.5	40.7	2.8

3-5 الانكماش الخطي:

يعبر الانكماش عن سلوك التربة عند انخفاض رطوبتها، ويعرف الانكماش الخطي بأنه نسبة النقصان في الطول لعينة التربة إلى طولها الأصلي، عند انخفاض رطوبتها. يقيس اختبار الانكماش الخطي التشوه النسبي لانكماش عينة طولية من عجينة التربة المحضرة برطوبة قريبة من قيمة رطوبة السيولة للتربة توضع في قالب معدني نصف اسطواني بأبعاد (2.5x14 cm).

في الدراسة الحالية، جففت العينة أولاً في جو المخبر حتى انفصال الجوانب بشكل واضح. ثم جففت في فرن مخبري بدرجة حرارة 110°C حتى الانكماش الكلي حيث أخذت القياسات بعناية، وفي حالات المزج مع المحسنات أخذت الرطوبة موافقة لحد السيولة الموافق للنسبة المزجية من الجدول(5−2)، وقد أظهرت النتائج الموضحة في الجدول (5−3) أن الانكماش الخطي يتقيد عند إضافة الجيوبولمر بالنسبة 5% وبشكل أفضل عند النسبة 10%، ويتعزز هذا التقييد عند إضافة 15% جيوبولمر لينعدم الانكماش بشكل كامل، وهي أفضل نتيجة تم الحصول عليها.

الجدول رقم (4) قيم التشوه والتشوه النسبي والانكماش الخطي مقابل مقابل نسب الإضافة من الجيوبولمر من أساس الغضار المكلسن

العينة	التسمية	Lo	L1	ΔL	ΔL/L	Lsi %
1	G-0 (ref)	140.1	110.1	30	0.2141	21.41
2	G-5	140.1	121	19.1	0.1363	13.63
3	G-10	140.1	132.5	7.6	0.054	5.4
4	G-15	140.1	140.1	0	0	-

الشكل رقم (3) عينات التربة والتربة مع الجيوبولمر في قوالب الانكماش بعد التجفيف النهائي

5- 4الانتفاخ الحر وضغط الانتفاخ في حلقة الأدومتر(ASTM D- 4645, 2435):

لتحديد الانتفاخ الحر، تم تحضير عينات من التربة بالرطوبة الطبيعية ، وذلك للعينة المرجعية بدون إضافات، وتلك المعالجة بإضافة الجيوبولمر وفق النسب المبينة في الجدول (2). حيث أضيف الماء المقطر إلى خلية الأدومتر لبدء الاختبار وأُخِذت قراءات التشوه (الانتفاخ) عند الأزمنة 1, 2, 4, 8, 15 و30 **دقيقة والأزمنة** 1, 2, 4, 8, 24, 48، 72 **و96 ساعة، وذلك بعد تطبيق حمل ارتكاز على العينة. بعد انتهاء فترة الـ (96) ساعة كانت فعالية الانتفاخ للعينات قد تلاشت، وتوقف الانتفاخ الحر وفق اتجاه واحد، وتم حساب الانتفاخ النسبي وفق محور واحد كنسبة بين مقدار زيادة ارتفاع العينة** Δh **وارتفاعها الأصلي** ho. ثم بدأت عملية التحميل المتدرج للوصول إلى تشوه انتفاخ مقداره صفر وتم تسجيل النتائج في الجدول (5).

الجدول رقم (5) قيم الانتفاخ الحر وضغط الانتفاخ مقابل النسب المزجية للتربة مع المحسنات

الانتفاخ الحر وضغط الانتفاخ في حلقة الأدومتر

العينة	التسمية	التشوه (الانتفاخ) (mm)	الارتفاع الأصلي للعينة (mm)	االانتفاخ الحر (التشوه النسبي) (%)	ضغط الانتفاخ (Kpa)
1	G-0 (ref)	1.67	20	8.35	80
2	G-5	0.63	20	3.15	25
3	G-10	0.11	20	0.55	5
4	G-15	0.0	20	0	0

يبين الجدول رقم (5) نتائج الانتفاخ الحر وضغط الانتفاخ للتربة قبل المعالجة بالجيوبولمر وبعده، وتظهر النتائج مدى التحسن الذي أمكن الوصول إليه بإضافة 15% من الجيوبولمر والذي أدى إلى تلاشي الانتفاخ الحر وضغط الانتفاخ وخروج التربة المحسنة من دائرة التربة الانتفاخية، بينما كان التحسين أقل عند النسبتين 10% و5% على الترتيب. يمكن تفسير تلاشي الانتفاخ الحر وضغط الانتفاخ عند إضافة النسبة الكافية من الجيوبولمر إلى التربة الغضارية الانتفاخية من خلال آلية عمل الجيوبولمر الذي يتكون من سلاسل جزيئية من الألومينوسيليكات، والتي تعمل كمادة رابطة بين حبيبات التربة، وضمن الوسط القلوي الذي سببه المحرض القلوي، وبوجود الرطوبة المناسبة، حيث تتشكل بنية حبيبة جديدة للتربة.

6-الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- **يمكن الحصول على الجيوبولمر من أساس الغضار المكلسن، من خلال المعالجة القلوية وبالشروط التي تم تطبيقها على الاختبارات الموصوفة في هذا البحث.**
- **إن انخفاض قيمة قرينة اللدونة للتربة الغضارية الانتفاخية موضوع هذا البحث هو دليل واضح على فعالية المعالجة بالجيوبولمر ومؤشر أولي على صلاحية التربة بعد التحسين للتأسيس سواءً في مشاريع الأبنية أو الطرق.**
- **إن انعدام قيم الانكماش والانتفاخ عند استخدام نسبة إضافة من الجيوبولمر مقدارها (15%) هو أفضل نتيجة تم الحصول عليها في تقييد الانتفاخ والانكماش للتربة الغضارية الانتفاخية موضوع البحث والتربة بعد التحسين صالحة للتأسيس بعيداً عن مشاكل الانتفاخ والانكماش.**

التوصيات:

بناءً على النتائج التي تم الوصول إليها في هذا البحث يكمن التوصل إلى التوصيات التالية:

- **استخدام الجيوبولمر من أساس الغضار المكلسن في تحسين ترب التأسيس الغضارية الانتفاخية لتقييد الانتفاخ والانكماش ولتصبح صالحة للتأسيس.**
- **دراسة تأثير إضافة الجيوبولمر من أساس الغضار المكلسن إلى التربة الغضارية الانتفاخية على خواص المتانة وكمثال عليها مقاومة الضغط غير المحصور(UCS) ومقاومة القص ومقاومة الاختراق والتي تمثلها نسبة تحمل كاليفورنيا(CBR).**
- **اجراء تجارب حقلية تثبت من خلال دراسة حالة حقلية، أن معالجة الترب الغضارية الانتفاخية باستخدام تقنية إنتاج جيوبولمر من أساس غضار مكلسن فعالة في تحسين هذا النوع من الترب الاشكالية.**

7-المراجع :References

[1] CEK T H, PERNÁ I, CNÁ K U, RÍMALV and ŠT˘EPÁNKOVÁ H, 2020- The Evaluation of Clay Suitability for Geopolymer Technology, **Minerals**, Vol.10, 852

[2] ZHANG M, GUO H, EL-KORCHI T, ZHANG G, TAO M, 2013- Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer, **Construction and Building Materials**, Vol. 47, pp 1468-1478

[3] CORRÊA-SILVA M, ARAÚJO N, CRISTELO N, MIRANDA T, GOMES A T, COELHO J, 2019- Improvement of a clayey soil with alkali activated low- calcium fly ash for transport infrastructures applications, **Road Materials and Pavement Design** , Vol 20, 8, pp 1912-1926

[4] AL BAKRI M, KAMARUDIN H, BNHUSSAIN M, RAFIZ A R, and ZARLNA y, 20l2- Effect of Na_2SiO_3/NaOH Ratios and NaOH Molarities on Compressive Strength of Fly-Ash-Based Geopolymer, **journal of the American Concrete Institute**, vol.109, 5, pp 503-508

[5] KAMARUDDIN F A, NAHAZANAN H, HUAT B K and ANGGRAINI V, 2020- Improvement of Marine Clay Soil Using Lime and Alkaline Activation Stabilized with Inclusion of Treated Coir Fibre , **Applied Science**, Vol.10, 2129, pp 2-16

[6] RONG-RONG Z and DONG-DONG M, 2020- Effects of Curing Time on the Mechanical Property and Microstructure Characteristics of Metakaolin-Based Geopolymer Cement-Stabilized Silty Clay , **Advances in Materials Science and Engineering**, Volume. 2020, pp 1-9

[7] KOMNITSAS K and ZAHARAKI D, 2007- Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. **Minerals engineering**, Vol. 20, 14, pp 1261-1277.

[8] CANAKCI H, GÜLLÜ H and ALHASHEMYM A, 2019- Performances of Using Geopolymers Made with Various Stabilizers for Deep Mixing, **Materials, MDPI**, Vol. 12, 2542, pp 2-32

[9] LUUKKONEN T, ABDOLLAHNEJAD Z, YLINIEMI J, KINNUNEN P. and ILLIKAINEN M, 2018- One-part alkali-activated materials: A review. **Cement and Concrete Research**, Vol.103, pp 21-34

[10] ABDEL-GAWWAD H A and ABO-EL-ENEIN S A, 2016- A novel method to produce dry geopolymer cement powder, **HBRC Journal**, Vol. 12, pp 13–24

[11] ABDULLAH M S, AHMAD F, AL BAKRI M, 2015- Geopolymer Application in Soil: A Short Review, **Applied Mechanics and Materials**, Vols. 754-755, pp 378-381

[12] AL-SWAIDANI A M, HAMOOD I and MEZIAB A, 2018- Thermally Treated Clay as a Stabilizing Agent for Expansive Clayey Soil: Some Engineering Properties, **Studia Geotechnica et Mechanica**, Vol. 40, 3, pp 220-232.

[13] FITOS M, BADOGIANNIS G E, SOTIRIOS G T and MARIA P, 2015- Pozzolanic activity of thermally and mechanically treated kaolins of hydrothermal origin. **Applied Clay Science**, Vols . 116-117, pp 182-192

[14] MITCHELL J K , 2005- **Fundamentals of soil behaviour**, 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc, pp 592

[15] CHRISTIDIS E G, PAIPOUTLIDI K, MARANTOS I, PERDIKATSIS V, 2020- Determination Of Amorphous Matter In Industrial Minerals With X-Ray Diffraction Using Rietveld Refinement, **Bulletin of the Geological Society of Greece**, vol. 56, pp 1-16.

[16] SLATY F, KHOURY H, WASTIELS J, RAHIER H, 2013- Characterization of alkali activated kaolinitic clay, **Applied Clay Science**, Vols. 75–76, pp 120-125

[17] EBNESJJAD S, 2014-Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding (book), chapter 4- **surface and Materials characterization Techniques**, William Andrew. 2th edition, pp 39-75.