مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (41) العدد (1) 2019
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (41) No. (1) 2019

Effect of Adding Calcined Clay and Lime on the Strength Properties Clayey Soil

Dr. Ibrahim Hammoud*
Dr.Aref Alswidani**
Ayman Meziab ***

(Received 12 / 11 / 2017. Accepted 27 / 1 / 2019)

□ ABSTRACT □

Calcined clay was obtained by thermal treatment of the clayey soil used in this study, with three levels of temperature ranges from (450, 650, 850°C) for 3hours in a laboratory furnace.

Pozzolanic activities of treated soil samples, were determined using Chapelle test modified at each level, and the third level(850°C/3hours) was chosen as it was the best result of Chapelle test. To emphasis the pozzolanic activity, another test was carried out by using cubic specimens (4x4x4cm) in compressive strength measurements of mortars containing calcined clay, lime and standard sand, the results showed appreciable development in strength with the increase of temperature range and curing time of specimens. Combinations of clayey soil, lime and calcined clay according to the best result obtained from Chapelle test, were prepared, lime was added by constant percentage (6%) of dry weight of soil in all combinations, while the calcined clay ranged from (0%) to (20%). The testes that carried out on each combination were: compression test in standard proctor mould, Atterberg limits, Unconfined Compressive Strength (UCS), California Bearing Ratio (CBR).

The optimum moisture content and maximum dry density were obtained, and the results showed improvement in consistency properties with the decrease in plasticity index by the increase of percentages of calcined clay added to the clayey soil stabilized by lime, unconfined compressive strength increased from (315 KPa) to (569 KPa), the most obviously parameter increasing was (CBR) which increased from (2.89%) to(79.41%), all of that at the combination 6% lime, 20% calcined clay. that was a clear indicator to the improvement that took place in the clayey soil strength properties, when treated with calcined clay and lime.

Key words: Calcined clay, lime, plasticity index, compaction properties, Unconfined Compressive Strength (UCS), California Bearing Ratio (CBR).

* **Professor in Civil Engineering Faculty, head of Department of Geotechnical Engineering, Damascus University, Syria**

** **Associate professor in faculty of Engineering, Arab International University, Damascus, Syria**

*** **Ph.D student Civil Engineering Faculty, Department of Geotechnical Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.**

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (41) العدد (1) 2019
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (41) No. (1) 2019

دراسة أثر إضافة الغضار المكلسن والكلس على خواص المتانة للتربة الغضارية الإنتفاخية

د. إبراهيم حمود*
د. عارف السويداني**
أيمن المذيب ***

(تاريخ الإيداع 12 / 11 / 2017. قُبِل للنشر في 27/ 1 / 2019)

□ ملخّص □

بدايةً تم الحصول على الغضار المكلسن بتعريض عينات من التربة الغضارية موضوع الدراسة، إلى مستويات مختلفة من درجات الحرارة هي على الترتيب 450, 650, 850 °C لمدة ثلاث ساعات في فرن مخبري، وتم اختبار الفعالية البوزولانية (الرابطة) لعينات التربة الغضارية المعالجة عند كل مستوى حرارة باستخدام اختبار شابيل المعدل (Chapelle test modified)، وهو الشق الكيميائي لاختبار الفعالية البوزولانية، وللتأكيد على الفعالية البوزولانية تم اختبار المقاومة للكسر لعينات مكعبية (4×4×4cm) محضرة من الغضار المكلسن والكلس والرمل القياسي، حيث أشارت النتائج إلى تطور مقاومة العينات للكسر مع زيادة درجة حرارة المعالجة للغضار المكلسن وزمن الإنضاج للعينات. تمّ تحضير تركيبات مزجية من التربة الغضارية والكلس والغضار المكلسن الذي تمّ الحصول عليه من نفس التربة، وفق أفضل نتيجة لاختبار الفعالية البوزولانية، ومن أجل عزل تأثير الغضار المكلسن، تمّ تثبيت نسبة إضافة الكلس عند القيمة (6%) من الكتلة الجافة للتربة، بينما أضيف الغضار المكلسن بنسب تتراوح بين (0 ،10% و20%)، وأجريت اختبارات رص التربة بقالب بروكتور النظامي ، خواص القوام (حدود اتربرغ)، الضغط غير المحصور وفق محور واحد (UCS)، نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR) ، وذلك عند كل نسبة مزجية ولكل اختبار من الاختبارات السابقة، حيث تم استخلاص الرطوبة المثالية والكثافة الجافة العظمى عند كل نسبة مزجية، وقد أظهرت النتائج تحسناً متزايداً في خواص القوام مع انخفاض قرينة اللدونة بتزايد نسبة الإضافة من الغضار المكلسن إلى التربة المحسنة بالكلس، أما الضغط غير المحصور وفق محور واحد(UCS) فقد ارتفعت قيمته من(315KPa) إلى (569 KPa) عند النسبة المزجية 6% كلس– 20%غضار مكلسن، في حين كان التحسن الأكثر وضوحاً هو في قيم نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR) التي ارتفعت من (2.89%) إلى (79.41%) عند النسبة المزجية ذاتها، وهي أفضل نتيجة تم الحصول عليها، في دلالة واضحة على تحسن المتانة الذي طرأ على التربة الغضارية المعالجة بالغضار المكلسن والكلس.

الكلمات المفتاحية: الغضار المكلسن، الكلس، قرينة اللدونة، خواص الرص، الضغط غير المحصور وفق محور واحد، نسبة تحمل كاليفورنيا

* أستاذ – كلية الهندسة المدنية– رئيس قسم الهندسة الجيوتكنيكية– جامعة دمشق– سورية
** أستاذ مساعد – كلية الهندسة– الجامعة العربية الدولية (الأوربية سابقاً)
*** طالب دكتوراه – كلية الهندسة المدنية– قسم الهندسة الجيوتكنيكية– جامعة دمشق– سورية

مقدمة:

تعدّ الترب الغضاريّة من الترب الإشكاليّة، ذات الآثار السلبية على المنشآت الهندسية المقامة عليها، وتُظهر هذه الترب قدرة تحمل منخفضة، إمكانية إنتفاخ وانكماش بوتيرة غير منتظمة، وذلك عند تعاقب الترطيب والجفاف على هذه التربة، الأمر الذي يجعلها غير مرغوبة في أساسات الطرق والأبنية.

تطورت في الآونة الأخيرة تقنيات وآليات مختلفة لتحسين هذا النوع من الترب، ومن أهم هذه التقنيات استخدام الإضافات المنرالية كالرماد المتطاير، هباب السيليكا، خبث أفرن الصهر، وكذلك الكلس والاسمنت، ويعّد الكلس أقدم محسن تقليدي استخدم لتحسين التربة الغضارية.(Mallela et al., 2004) [1].

إن تحسين التربة الغضارية بالكلس يعني إضافة نواتج حرق الحجر الكلسي المكون بشكل أساسي من كربونات الكالسيوم، وهذه النواتج هي أوكسيد الكالسيوم (CaO) أو ما يسمى بالكلس الحي، أو ماءات الكالسيوم ($Ca[OH]_2$) أو مايسمى بالكلس المتميه. ويعتبر الكلس الحي الأكثر استخداماً لتحسين التربة في أوربا (Bell, 1989) [2].

أشارت العديد من الدراسات التي أجريت على استخدام الكلس لتحسين الترب الغضارية (Bell,1996; Kassim and Chern, 2004; Rao and Shivananda, 2005; Sakr et al, 2009; Ghobadi et al., 2014)[4-8] إلى أن النسبة المثالية لإضافة الكلس هي بين 1% و 3% من الكتلة الجافة للتربة، وما يزيد لا يؤدي إلى تغيرات في حد اللدونة (PL)، لكن زيادة المقاومة للتربة المحسنة بالكلس تظهر عند إضافة الكلس بالنسب بين 2% و 8% من الكتلة الجافة للتربة. (al Swiadni et al, 2016) [3] . وبما أن موضوع هذا البحث هو دراسة التغيرات التي تطرأ على محددات المتانة للتربة الغضارية، فقد تمَّ اختيار نسبة الإضافة من الكلس الحي 6% من الكتلة الجافة للتربة.

إنَّ إضافة الكلس إلى التربة الغضارية، يحسن الخواص الهندسية عبر ما يسمى التبادل الكاتيوني (cation exchange)، التجمع والتلبد (flocculation agglomeration)، كربنة الكلس (lime carbonation)، والتفاعل البوزولاني (pozzolanic reaction). عمليات التبادل الكاتيوني والتجمع والتلبد تتم بسرعة وتحدث تغيرات فورية في خواص التربة، بينما التفاعل البوزولاني هو عملية تعتمد على الوقت (Harichane et al, 2010) [9].

وقد توصلت الدّراسات الحديثة إلى إمكانية زيادة كفاءة إضافة الكلس بشكل كبير، مع استعمال الإضافات الرابطة، حيث وجد بعض الباحثين(Zoubir et al, 2013; al-Swaidani et al, 2016) [3][10]، أنَّ قابلية تشغيل الترب الغضارية، ومقاومتها قد تحسنتا بشكل كبير بعد اللجوء إلى المعالجة المركبة (combined treatment) أي إضافة الاثنين معاً (الكلس و الإضافة الرّابطة أو الفلزيّة).

ومن الإضافات الرابطة التي انتشر استعمالها مؤخراً كبديل جزئي عن الاسمنت البورتلاندي في الملاطات الإسمنتية والخرسانة. الغضار المكلسن (calcined clay) ، وظهرت هذه التسمية للمرة الأولى بشكل موثق في المواصفة الأوربية (EN 197-1:2000)، والغضار المكلسن هو ناتج المعالجة الحرارية للغضار بظروف مدروسة، وإنَّ من أوائل الأبحاث التي أجريت على أثر المعالجات الحرارية على عينات من التربة الغضارية كانت للباحث (Laughlin R.G1959) [11] الذي اختبر ثلاث ترب غضارية أساسية (الكاولينيت Koalinite، الايليت Illite، المنتمورايلونايت Montmorillonite)، حيث عرّض هذه الترب إلى ثلاثة مستويات حرارة مختلفة، ووجد بالنتيجة أن الخواص الهندسية قد تغيرت بالمعالجات الحرارية بشكل

ملحوظ، حيث انخفضت قرينة اللدونة(PI)، ازداد حجم حبيبات التربة، انخفضت الكثافات الجافة العظمى، ازدادت مقاومات القص. كما رصد تحولات منرالية مهمة تمَّ اختبارها باستخدام التحليل بجهاز الأشعة السينية التفريقي الـ

(XRD) حيث تحول الكاولينيت عند درجة الحرارة 1000 °C إلى موليت Mollite، كذلك تحول الايليت و المنتمورايلونايت عند درجة الحرارة 1000 °C إلى سبانل(spinel).

إلا أنَّ معالجات من هذا النوع تؤدي إلى الانتقال من حالة بلورية للمنرالات الغضارية إلى حالة أخرى، ولا تؤدي إلى تفعيل الخواص الرابطة (البوزولانية) للمنرالات الغضارية، لذلك قام باحثون آخرون:

(ILIĆ. B. R et al,2010; Mechti et al,2012; Fitos et al. 2015) [12,13,14] بالحصول على الغضار المكلسن، بتعريض عينات من ترب غضارية أساسية أو طبيعية (as received) إلى درجات حرارة ما دون الانصهار للمنرالات الغضارية، مع التبريد السريع لتفادي إعادة التشكل البلوري للمنرالات الغضارية، وتوصلوا إلى نتائج تفيد بأن الخواص الرابطة لهذه العينات قد تطورت بشكل كبير.

يهتم هذا البحث بإثبات إمكانية الحصول على الغضار المكلسن من ترب غضارية محلية (as received)، ورصد تأثير إضافة الغضار المكلسن إلى التربة الغضارية، ودراسة تأثير هذه الإضافة لوحدها أو بالمشاركة مع الكلس على خواص المتانة للتربة الغضارية، من خلال دراسة تجريبية مقارنة للتربة الغضارية قبل وبعد استعمال الإضافات المعتمدة في هذا البحث، بغية اثبات كفاءتها في تحسين التربة الغصارية، ويشمل البحث مجال الطرق وأساسات الأبنية.

توزع الترب الغضارية في سورية:

تغطي الترب االغضارية $20000Km^2$ من مساحة القطر العربي السوري، ويتركز معظمها في المنطقة الجنوبية الغربية(Abed 2008)[15]. وتتميز بلونها البني المائل إلى الحمرة، وهي عبارة عن نواتج التجوية للصخور البركانية وتحديداً البازلت، وتسبب الترب الغضارية في مناطق متعددة من القطر العربي السوري أضراراً جدية تلحق بالبنية التحتية، الأمر الذي يجعل تحسين هذه الترب ضرورياً (al Swiadni et al, 2016) [3].

أهمية البحث وأهدافه:

الأهمية:

برزت مؤخراً، أهمية استخدام المحسنات الطبيعية، وخصوصاً في البلدان التي تتوفر فيها هذه المحسنات بكميات إقتصادية ، حيث تقلل هذه المحسنات من استخدام مادة الاسمنت الذي تعتبر صناعته أحد أهم المسؤولين عن انبعاثات غاز الـ (CO_2) الضارة بالبيئة.

أما الأهمية الاقتصادية فتبرز من ناحية التركيز على استخدام المواد المحلية، ابتداءً من تربة الموقع التي تتم معالجتها حرارياً لتحسن نفسها بنفسها، ثم التحسين بمواد الإضافة كالكلس وهذه المواد متوفرة محلياً بكميات تسمح بالاستثمار المجدي لهذه الثروات الطبيعية.

تعدُّ الأبحاث والدراسات التي تطرقت إلى تحسين التربة الغضارية، بإضافة الغضار المكلسن والكلس، قليلة نسبياً في الأدبيات العلمية المتعلقة بتحسين الترب الغضارية، إلا أن هذه الأدبيات تزخر بالأبحاث والأوراق العلمية لاستخدام الغضار المكلسن الناتج عن حرق الغضار، كبديل جزئي عن الاسمنت البورتلاندي في الملاطات الإسمنتية والخرسانة.

الأهداف:

يهدف البحث إلى تحري التغيرات التي تطرأ على متانة التربة الغضارية، نتيجة المعالجة بالكلس والغضار المكلسن وذلك بعد تحري الفعالية البوزولانية لعينات التربة المعالجة بالحرارة، باستخدام اختبار شابيل المعدل (test modified Chapelle) ومن ثم التأكيد عليها بتجربة المقاومة الميكانيكية وذلك لتقرير فعالية إضافة نسب مختلفة من الغضار المكلسن إلى هذه التربة، مع أو بدون الكلس، والوصول إلى نتائج مفيدة.

طرائق البحث ومواده:

1 التربة الغضارية (clayey soil):

تمَّ إحضار عينات التربة من محافظة درعا منطقة غباغب ، حيث تم اعتيانها على عمق يتراوح بين 40 إلى 100 سم، وأحضرت عينة الرطوبة ضمن كيس بلاستيكي محكم الإغلاق، حيث أجريت كافة التجارب عليها في مخبر ميكانيك التربة النتائج مبينة في الجدول (3-1).

الجدول (3-1) الخواص الأساسية للتربة الغضارية المدروسة

اللون	العمق (m)	الوزن النوعي	المار من المنخل رقم 200(%)	حد السيولة LL (%)	حد اللدونة PL (%)	قرينة اللدونة PI (%)	تصنيف التربة حسب (USCS)	الرطوبة المثالية (OMC)(%)	الكثافة الجافة العظمى (MDD)(KN/m^2)
بني إلى أحمر	1	2.68	95	58.8	30	28.8	CH	27	1.48

-2 الغضار المكلسن:

تعرف المواصفة الأوربية (EN197-1:2000) البوزولانا المكلسنة الطبيعية، على أنها مواد ذات أصل بركاني، غضاريات (clays)، طفل (shales)، أو صخور رسوبية، تم تفعيلها عن طريق المعالجة الحرارية، فأصبحت تنطبق عليها مواصفات المواد البوزولانية (الرابطة) الطبيعية [16].

تمَّ تحضير الغضار المكلسن بتعريض عينات من التربة الغضارية إلى درجات حرارة عالية، ليتم اختبار إضافة ناتج هذه المعالجة (الغضار المكلسن) بنسب إلى التربة الغضارية الأصلية، حيث تؤدي هذه المعالجة الحرارية إلى نزع الماء البني‌اوي من التربة الغضارية وبالتالي تفعيل الخاصة الرابطة (البوزولانية) لهذه التربة، تم في هذه الدراسة تعريض عينات من التربة الغضارية موضوع الدراسة، والموصوفة في البند (3-1)، إلى ثلاث مستويات من درجات الحرارة هي على الترتيب 450, 650, 850 °C ، لمدة ثلاث ساعات، في فرن مخبري مضبوط الحرارة آلياً، وتمَّ اختبار الفعالية البوزولانية لعينات التربة الغضارية المعالجة عند كل مستوى حرارة من المستويات السابقة الذكر، باستخدام اختبار شابيل المعدل (Chapelle test modified). وكذلك بإجراء اختبار المقاومة على الكسر لعينات (4x4x4cm) محضرة من الغضار المكلسن والكلس والرمل القياسي.

3- الكلس (Lime):

تمّ استجرار عيّنات الكلس الحي(Quick Lime) المستعملة في الدّراسة من محافظة حماة على شكل كتل مشوية حيث تم طحن وتحضير العينات مخبرياً وأجريت عليها سلسلة من التجارب المخبرية و التحليل الكيميائي.

وتشترط الجمعية العامة للكلس أن تكون نسبة أكسيد الكالسيوم CaO أكبر من 60% في الكلس، وذلك حتى يكون الكلس صالحاً لتحسين التربة الغضارية [17]. ويبيّن الجدول رقم (3-3) نتائج التحليل الكيميائي للكلس المستعمل بالدّراسة التي تؤكّد صلاحية الكلس المستجر لتحسين التربة.

الجدول (3-3) نتائج التحليل الكيميائي والوزن النوعي للكلس الحي

الأوكسيد	النسبة المئوية
CaO	93.7
MgO	0.53
Fe_2O_3	0.47
Sulfates (So_4)	1.2
الفاقد بالحرق	3.9
الوزن النوعي	2.2

الدرسة التجريبية:

تستند الطريقة التجريبية في هذا البحث، على إجراء اختبارات القوام، الرص، الضغط غير المحصور ونسبة تحمل كاليفورنيا، على التربة والتربة مع الإضافات، ومقارنة النتائج للعينات المعالجة بالغضار المكلسن و بالكلس أو التركيب المزجي منهما، مع العينة المرجعية من التربة الغضارية غير المعالجة، و مناقشة هذه النتائج وصولاً إلى الاستنتاجات والتوصيات.

تمّ تحضير تركيبات مزجية من التربة الغضارية والكلس و الغضار المكلسن، بنسبة إضافة من الكلس هي (6%) ومن الغضار المكلسن تتراوح بين (0% ,10% و20%) وفق ما هو موضح في الجدول رقم (4)، وذلك لعزل تأثير الغضار المكلسن كمحسن لخواص المتانة للتربة الغضارية.

أما التجارب التي تمّ إجراؤها على مواد الإضافة والتربة والتركيبات المزجية، فكانت على الشكل التالي:

- اختبار الاستهلاك الأولي للكلس (ASTM D 6276)، لتحديد النسبة الدنيا من الكلس التي تصلح لتحسين التربة الغضارية موضوع التحسين.
- اختبار الفعالية البوزولانية للغضار المكلسن بشقه الكيميائي، وهو اختبار شابيل المعدل (test modified Chapelle) وفق النورم الفرنسي (NF P18-513) لتحديد درجة الحرارة المناسبة ومدة المعالجة الحرارية التي تعطي أفضل فعالية بوزولانية، أما الشق الميكانيكي فيتم من خلال إجراء اختبار المقاومة لكسر عينات مكعبية بأبعاد (4x4x4cm) محضرة من مزيج الغضار المكلسن مع الكلس والرمل القياسي وفقاً للمواصفة الأوربية (EN 196-1) وذلك لتحديد فعالية الغضار المكلسن كمادة رابطة ومحسن فعال للتربة الغضارية.

- تجربة حدود اتربرغ للتربة والتربة مع الإضافات (حد السيولة، حد اللدونة، قرينة اللدونة) (ASTM D 4318-93)
- تجربة الرص في قالب بروكتور - النظامي (ASTM D 698-91)
- تجربة الضغط غير المحصور وفق محور واحد (UCS) (ASTM D 2166 – 98a)
- تجربة نسبة تحمل كاليفورنيا(CBR) (ASTM D 1883-94)

أجريت كافة تجارب التربة مع الإضافات في مخبر ميكانيك التربة كلية الهندسة المدنية في جامعة دمشق في الفترة الواقعة بين 2017/1/8 إلى 2017/9/8، أما اختبارات المواد والفعالية البوزولانية بشقيها الكيميائي والميكانيكي فأجريت في مخابر مركز الاختبارات والأبحاث الصناعية في دمشق.

الجدول رقم(4) نسب خلط الإضافات إلى التربة (كتلة/كتلة)

التسمية	نموذج الخلط بالنسبة المئوية		
	التربة	الغضار المكلسن(cc)	الكلس(L)
CC0L0[†]	100	0	0
CC0L6	94	0	6
CC10L0	90	10	0
CC20L0	80	20	0
CC10L6	84	10	6
CC20L6	74	20	6

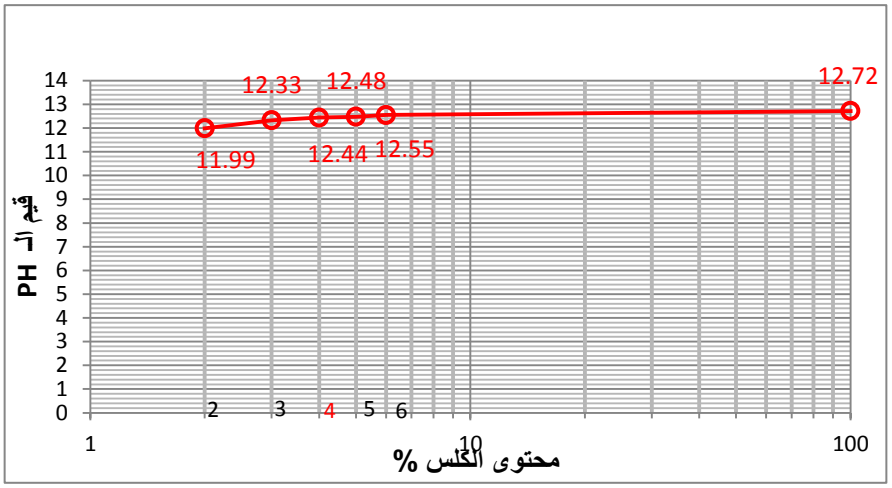
النتائج والمناقشة:

1 الاستهلاك الأولي للكلس:

الهدف من هذه التجربة هو تحديد النسبة المئوية من الكلس، التي تجب إضافتها لتحسين التربة. ميزة هذه التجربة أنها تعطي نتائج سريعة، وتعطي مؤشراً عن الكمية الدنيا من الكلس، اللازمة للحصول على التحسين المطلوب لخواص التربة المعالجة، لذلك يجب أن تكون النسب المعتمدة للتحسين، أعلى من القيمة المحددة بهذه التجربة، و بالتالي فإن مبدأها الأساسي يعتمد على إضافة كمية كافية من الكلس للتربة المراد تحسينها، للوصول إلى قلوية تربة قدرها PH=12.4، وذلك لضمان استمرارية التفاعل البوزولاني بين التربة والكلس، وذلك حسب المواصفة (ASTM D 6276) أو المواصفة البريطانية (BS 1924:part2:clause 5.4) أجريت التجربة في مخبر ميكانيك التربة و كانت النتائج كما هو موضح في الشكل (5-1).

بينت التجربة، أن نسبة الكلس الدنيا المطلوبة، لتحسين التربة الغضارية موضوع الدراسة، هي 4% من الكلس، مأخوذاً كنسبة وزنية من وزن التربة الجاف، وقد تم اعتماد نسبة الإضافة من الكلس في هذا البحث 6% لموافقة شرط تحسين المتانة للتربة الغضارية (al Swiadani et al, 2016)[3].

[†] **CC: stands for clacined clay, L: stands for Lime**



الشكل (5-1) نتائج تجربة نسبة استهلاك الكلس

2 اختبار الفعالية البوزولانية (الرابطة) للغضار المكلسن:

2-1اختبار شابيل المعدل (Chapelle test modified) وفق النورم الفرنسي(NF P18-513):

يهدف هذا الاختبار إلى تحديد كمية ماءات الكالسيوم $Ca(OH)_2$ التي تم تثبيتها بواسطة الغضار المكلسن، من خلال المعايرة لكمية حمض كلور الماء، اللازم للتفاعل مع ماءات الكالسيوم، في عينتين الأولى (مرجعية) تحوي فقط 2g من الكلس الحي والعينة الثانية تحوي إضافة إلى الـ 2g من الكلس الحي 1g من الغضار المكلسن، حيث يتم تسخين العينتين في دورقين مع 250ml من الماء منزوع الشوارد ومنزوع CO_2 بدرجة حرارة 85±5ºC لمدة 16 ساعة، بعدها تتم المعايرة بحمض كلور الماء تركيز 0.1 لاستخراج حجم الحمض الذي يختفي عنده لون المشعر، ويتم الحصول على V_1 و V_2. حيث:

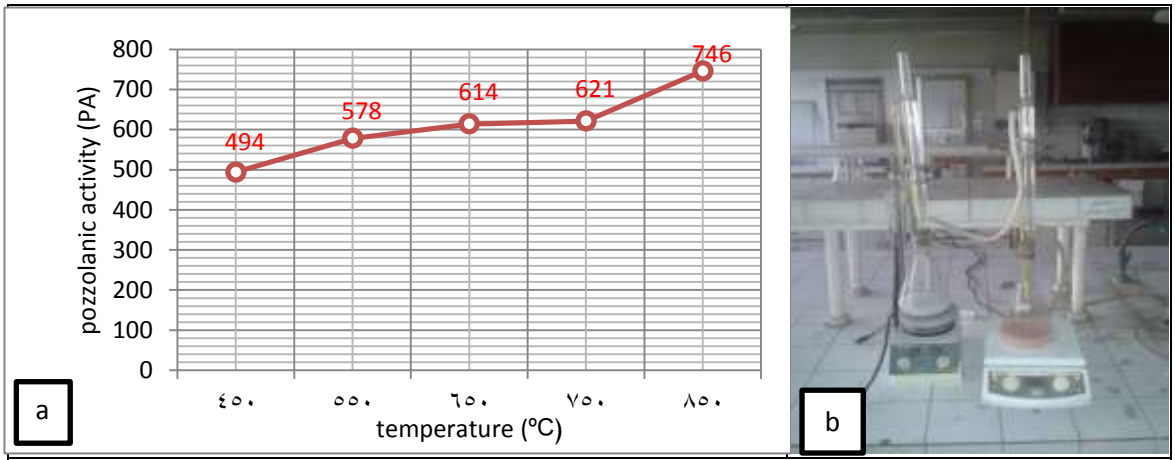
V_1: حجم حمض كلور الماء اللازم للتفاعل بدون الغضار المكلسن.

V_2: حجم حمض كلور الماء اللازم للتفاعل مع الغضار المكلسن.

ويتم تحديد كمية ماءات الكالسيوم $Ca(OH)_2$ التي تم تثبيتها بواسطة الغضار المكلسن وفق العلاقة التالية:

$$Ca(OH)2 = 2 \times \frac{V1 - V2}{V1} \times \frac{74}{56} \times 1000$$

يبين الشكل (5-2-1) نتائج الاختبار لعدة عينات من التربة موضوع الدراسة، تم معالجتها بدرجات حرارة مختلفة،



الشكل (5-2-1) a- نتائج اختبار شابيل المعدل للفعالية البوزولانية مقابل درجات الحرارة b- التجربة المخبرية الحقيقة

بقصد المقارنة للحصول على أفضل نتيجة وقد ظهرت أفضل نتيجة عند العينة المعالجة بدرجة الحرارة 850 ºC لمدة ثلاث ساعات.

2-2 تقييم الفعالية البوزولانية بالطريقة الميكانيكية:(مقاومة الضغط):

إن تطور المقاومة في مونة الكلس-البوزولانا-الرمل هو من أفضل الطرق وأكثرها موثوقيةً، لقياس الفعالية البوزولانية، (Syanam et al 1991)[18]، لذلك تم تحضير عينات مكعبية بأبعاد (4x4x4cm) من مزيج الغضار المكلسن مع الكلس المتميه (CC/L) بنسبة مزج وزنية تساوي 3 إلى 1، ومن ثم المزج مع الرمل القياسي بنسبة 3 إلى 1 وزناً أيضاً (ثلاثة أجزاء من الرمل القياسي وجزء من (CC /L)) مع نسبة الماء إلى الأجزاء الصلبة تساوي 0.77.

كافة العينات تم تحضيرها وفقاً للمواصفة الأوربية1-196 EN[19]، حيث تم إنضاج العينات لمدة 28-7-2 يوم، واجراء تجربة مقاومة الضغط بجهاز كسر العينات بالضغط، والمقارنة مع عينات مماثلة محضرة من الاسمنت البورتلاندي مع الرمل القياسي بنفس النسب الوزنية وبنفس نسبة الماء إلى الاسمنت (0.77)، وذلك لتحديد فعالية الغضار المكلسن كمادة رابطة ومحسن فعال للتربة الغضارية.

النتائج التي تم الحصول عليها نتيجة الإنضاج للعينات لمدة 7 أيام موضحة في الجدول (5-2-2)، وتشير إلى وصول العينات المحضرة من الكلس والغضار المكلسن والرمل القياسي إلى النسبة المطلوبة من المقاومة وهي 75% من مقاومة عينة محضرة من الاسمنت البورتلاندي والرمل القياسي في العينات التي تم معالجتها بدرجات حرارة ,650 750,850ºC على الترتيب. ويعود تفسير ذلك إلى تراجع الطور البلوري وتزايد الطور الزجاجي نتيجة المعالجة الحرارية، بما يتوافق مع ما توصل إليه الباحثون (Ilić R B et al,2010; Mechti W et al,2012; Fitos M et al, 2015) [14-13-12] حيث أن أصل الفعالية البوزولانية يكمن في المحتوى العالي من السيليكا الفعالة في المادة البوزلانية (Massazza. F , 1993) [20].

الجدول (5-2-2) مقاومة الكسر بالضغط لعينات محضرة من الغضار المكلسن والكلس المتميه والرمل القياسي

درجة حرارة المعالجة (Cº)		450	650	850
مقاومة الكسر بالضغط (MPa) لوسطي ثلاث عينات	إنضاج 2 يوم	-	-	2.4
	إنضاج 7 أيام	-	3.05	6.7
	إنضاج 28 يوم	2.75	4.22	11.95

من نتائج اختبار المقاومة الميكانيكية والفعالية الكيميائية لعينات الغضار المكلسن نجد أن أفضل نتيجة للمعالجة الحرارية هي التي تمت بدرجة الحرارة 850ºC لمدة 3 ساعات والتبريد السريع إلى الحرارة المحيطة العادية، وبالتالي سيتم اعتماد العينات المحضرة بهذه الشروط في النسب المزجية الواردة في الجدول رقم (4).

الشكل (5-2-2) قالب الصب للمكعبات المحضرة من الغضار المكلسن والكلس و الرمل القياسي

3 خواص القوام (حدود أتربرغ) : ASTM-D4318-93

تعتبر قرينة اللدونة مؤشر مهم جداً، ومحدد من محددات سلوك التربة الغضارية، وقد صنف الباحثان (William and Donaldson-1980) [13] درجة انتفاخ التربة الغضارية بناءَ على قيمة قرينة اللدونة. يبين الجدول (5−3−1) العلاقة بين قرينة اللدونة، وقابلية التربة للانتفاخ، وكيف أن درجة انتفاخ التربة الغضارية تزداد بازدياد قيم قرينة اللدونة وفق المعيار الذي توصل إليه الباحثان.

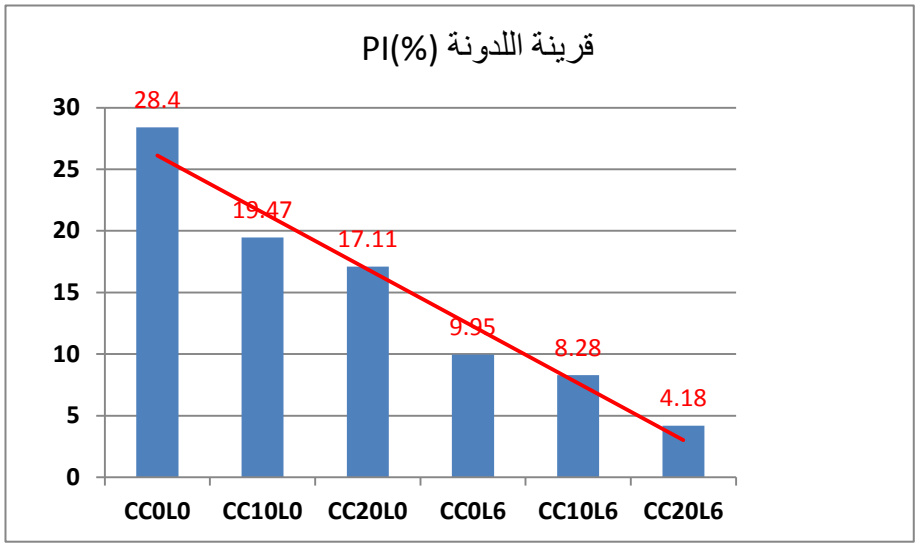
الجدول (5−3−1) تصنيف درجة الانتفاخ مقابل قرينة اللدونة after (William and Donaldson, 1980)

قرينة اللدونة (%) PI	درجة الانتفاخ
PI< 12 —	منخفضة
12 < PI < 24	متوسطة
24 < PI < 32 —	عالية
PI > 32 —	عالية جداً

بينت تجارب حدود أتربرغ التي أجريت على التربة الغضارية، والتربة مع الإضافات، في هذا البحث، أن إضافة مركب الكلس و الغضار المكلسن يؤدي إلى زيادة ملحوظة في حد اللدونة ونقصان في حد السيولة، وبالتالي يؤدي إلى نقصان قرينة اللدونة، وهذا مؤشر على التحسن الذي طرأ على التربة الغضارية المحسنة، كما أن إضافة الغضار المكلسن لوحده أدت إلى تخفيض قرينة اللدونة ولكن بنسبة أقل، إنخفاض قرينة اللدونة يعبر عن إرتفاع قابلية التشغيل للتربة، وتغير التركيب الحبي لها. قيم حد السيولة وحد اللدونة و قرينة اللدونة مبينة في الجدول(5-3-2). كما يبين الشكل (5−3) قيم قرينة اللدونة مقابل النسب المزجية من الكلس والغضار المكلسن.

الجدول (5–3–2) قيم حد السيولة، حد اللدونة، و قرينة اللدونة مقابل النسب المزجية من الغضار المكلسن والكلس

العينة	الرمز	حد السيولة(%)	حد اللدونة(%)	قرينة اللدونة (%)PI
1	CC0L0	62.1	28.9	33.2
2	CC10L0	56	36.53	19.47
3	CC20L0	54.5	37.39	17.11
4	CC0L6	50.34	40.39	9.95
5	CC10L6	49.16	40.88	8.28
6	CC20L6	46	41.82	4.18



الشكل(5–3) اللدونة مقابل النسب المزجية من الغضار المكلسن والكلس

4 تجربة بروكتورالنظامي:ASTM-D698-91

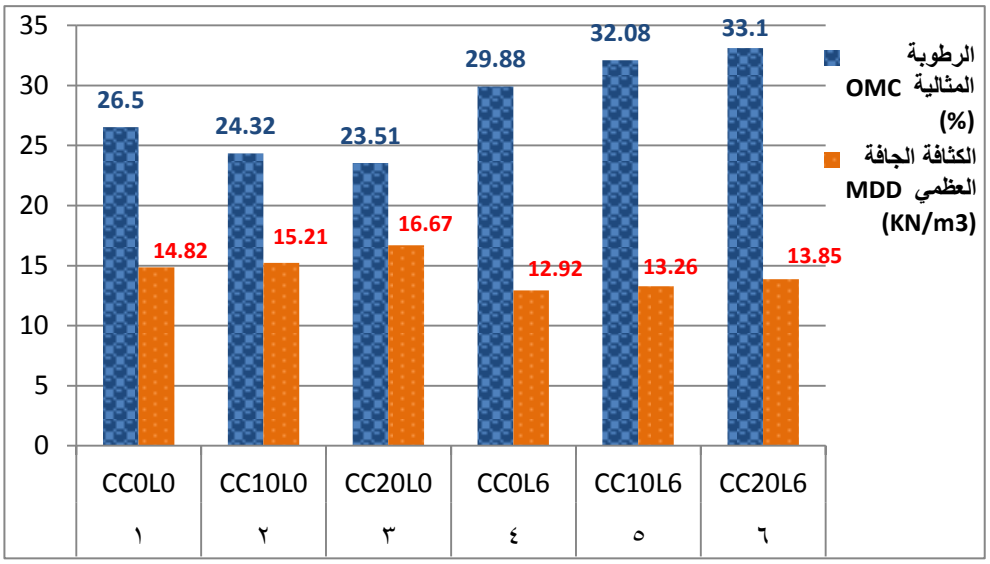
كان الهدف من إجراء تجربة الرص، في قالب بروكتور النظامي، تحديد تأثير إضافة المحسنات على صفتين مهمتين لسلوك التربة، وهما الكثافة الجافة العظمى، والرطوبة المثالية. و ذلك لعينة التربة المرجعية والعينات المخلوطة بالكلس والغضار المكلسن وفق أفضل نتيجة لاختبار الفعالية البوزولانية.

أظهرت النتائج الموضحة في الجدول (5–4) أن الرطوبة المثالية تزداد بينما الكثافة الجافة العظمى تتناقص بإضافة الكلس لوحده، وهذا يعود إلى انخفاض الوزن النوعي للكلس مقارنة بالتربة، أما زيادة الرطوبة المثالية فيعود إلى خاصية الكلس في الاحتفاظ بالماء (water retention) ، أما ما يتعلق بتأثير الغضار المكلسن لوحده فقد لوحظ تناقص الرطوبة المثالية وازدياد الكثافة الجافة العظمى مع زيادة نسبة الإضافة من الغضار المكلسن، والسبب في ذلك يعود إلى ارتفاع قيمة الوزن النوعي للغضار المكلسن نتيجة المعالجة الحرارية، أما تناقص الرطوبة المثالية فيعود إلى خاصية الشراهة المتدنية للغضار المكلسن للماء (low affinity to water)، و زيادة الكثافة الجافة العظمى مؤشر على

تحسن مواصفات التربة. في حين أن النسب المزجية من الغضار المكلسن والكلس أبقت على هاتين القيمتين (الكثافة الجافة العظمى والرطوبة المثالية) ضمن حدود قريبة من قيمها في التربة الأصلية غير المعالجة كما يظهر في الجدول (4-5).

الجدول (4-5) قيم الرطوبة المثالية، الكثافة الجافة العظمى، مقابل النسب المزجية المختلفة من الكلس والغضار المكلسن

رقم العينة	التسمية	الرطوبة المثالية (%) OMC	الكثافة الجافة العظمي MDD (KN/m^3)
1	CC0L0	26.5	14.82
2	CC10L0	24.32	15.21
3	CC20L0	23.51	16.67
4	CC0L6	29.88	12.92
5	CC10L6	32.08	13.26
6	CC20L6	33.1	13.85



الشكل (4-5) قيم الرطوبة المثالية، الكثافة الجافة العظمى، مقابل النسب المزجية المختلفة من الكلس والغضار المكلسن

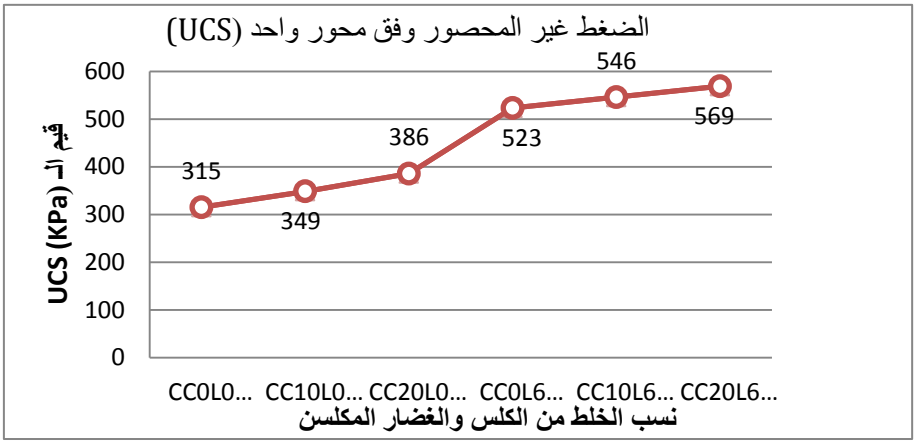
5- الضغط المحصور وفق محور واحد (UCS) (ASTM D 2166 – 98a):

أجريت تجربة الضغط وفق محور واحد على عينات التربة المعالجة بالكلس والغضار المكلسن، وفق أفضل نتيجة لاختبار الفعالية البوزولانية، وعلى العينة المرجعية، وتم تشكيل العينات في المخبر وفق الكثافة الجافة العظمى والرطوبة المثالية التي تم الحصول عليها من تجربة رص بروكتور النظامي و المبينة في الجدول (5-5)، أما نتائج مقاومة الضغط وفق محور واحد فهي موضحة في الجدول 5-5، و تشير إلى أن المقاومة الضغط غير المحصور وفق محور واحد قد تحسنت بشكل واضح عند إضافة الكلس بنسبة 6%، و قد تعزز هذا التحسن بمشاركة الغضار المكلسن بالنسبة الأولى وهي 10%، أما أفضل نتيجة تم الحصول عليها لمقاومة للضغط غير المحصور UCS، فكان عند النسبة المزجية 6% كلس و 20% غضار مكلسن. في حين أن الزيادة في قيم هذه المقاومة كانت طفيفة عند

الاقتصار على إضافة الغضار المكلسن لوحده بالنسبة 10%، وزا دت عند زيادة نسبة الإضافة إلى 20% من الغضار المكلسن، الأمر الذي يشير إلى التحسين الذي يطرأ على التربة الغضارية نتيجة المعالجة بالغضار المكلسن لوحده أو بالمشاركة مع الكلس.

الجدول (5-5) قيم الضغط غير المحصور وفق محور واحد (UCS) مقابل نسب المزج من الكلس (L) والغضار المكلسن(CC)

العينة	التسمية	الضغط غير المحصور وفق محور واحد (UCS)
1	CC0L0	315
2	CC10L0	349
3	CC20L0	386
4	CC0L6	523
5	CC10L6	546
6	CC20L6	569



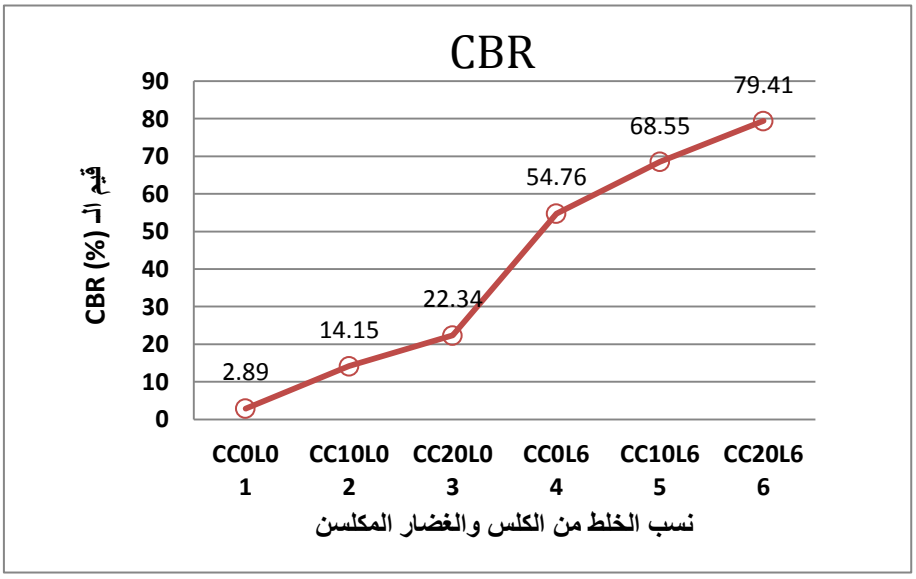
الشكل (5-5) قيم الضغط غير المحصور وفق محور واحد (UCS) مقابل نسب المزج من الكلس (L) والغضار المكلسن(CC)

6 نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR) :

تعبر هذه التجربة عن أهم متغير يمثل متانة التربة المستخدمة في أعمال الطابق الترابي للطرق، و قد أجريت التجربة بعد رص العينات المعالجة و غير المعالجة في قالب الـ CBR إلى الكثافة الجافة و الرطوبة المثالية عند كل نسبة مزجية والتي تم الحصول عليها في تجربة رص بروكتور في القالب النظامي، و بعد غمر هذه العينات بالماء لمدة 96 ساعة، وذلك لمحاكاة الحالة الأكثر خطورة. يبين الجدول (5-2) قيم نسب تحمل كاليفورنيا CBR للعينة المرجعية والعينات المعالجة.

الجدول (5-2) قيم نسبة تحمل كاليفورنيا CBR مقابل نسب الإضافة المختلفة من الكلس(L) والغضار المكلسن(CC)

العينة	التسمية	CBR
1	CC0L0	2.89
2	CC10L0	14.15
3	CC20L0	22.34
4	CC0L6	54.76
5	CC10L6	68.55
6	CC20L6	79.41



الشكل (5-6-1) قيم نسبة تحمل كاليفورنيا CBR مقابل نسب الإضافة المختلفة من الكلس(L) الغضار المكلسن(CC)

نلاحظ من هذه النتائج، أن إضافة الكلس والغضار المكلسن إلى التربة الغضارية، أدى إلى ارتفاع نسبة تحمل كاليفورنيا بنسب متفاوتة، حيث أدت إضافة الكلس بنسبة من 6% إلى تحسن كبير في قيمة الـ CBR للتربة من 2.89% إل54.76%، بينما إضافة الغضار المكلسن بنسبة 10% حسنت الـ CBR من 2.89% إلى 14.15%، وعند النسبة 20% من الغضار المكلسن، وصلت قيمة الـ CBR إلى 22.34%، فيما أدت إضافة التركيبات المزجية للتربة الغضارية إلى تحسن كبير من 2.89% إلى 68.55% عند التركيبة المزجية 6% كلس و 10% غضار مكلسن، وعند التركيبة المزجية 6% كلس و20% غضار مكلسن، وصلت قيمة الـ CBR إلى 79.41% و هي أفضل نسبة تحسين بين النسب المختبرة في هذا البحث، وفق ما هو مبين في الشكل (5- 6 -1).

يبين الجدول التالي طريقة الـ AASHTO في تقييم تربة الأساس للطرق وفقاً لقيم الـ CBR[21]، و بعرض القيم التي تم الحصول عليها في الجدول (5-6-2) على جدول الـ AASHTO، نلاحظ أن إضافة الغضار المكلسن لوحده رفعت

تقييم تربة الأساس من ضعيف جداً، إلى ضعيف و معتدل عند إضافتها بالنسبتين 10% و 20% على الترتيب، ذلك عند القيمتين (14.15) و (22.34) للـ CBR. بينما إضافة الكلس لوحده رفعت تقييم تربة الأساس من ضعيف جداً، إلى جيد وذلك عند القيمة (54.76) في حين أن كافة التركيبات المزجية من الغضار المكلسن والكلس ارتقت بتقييم تربة الأساس إلى جيد جداً عند القيمتين (68.55) و(79.41).

الجدول (5-6-2) طريقة الـ AASHTO في تقييم تربة الأساس للطرق وفقاً لقيم الـ CBR[21]

Table 1. Subgrade soil quality.

Rating (%)	Modulus of Subgrade Reaction (k, pci)	CBR Value
Very Good	Greater than 550 pci	> 55
Good	400 to 550 pci	40 - 55
Fair	250 to 350 pci	20 - 35
Poor	150 to 250 pci	6 - 20
Very Poor	Less than 150 pci	< 6

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- أمكن الحصول على الغضار المكلسن، بتعريض عينات من التربة الغضارية المختبرة بدون معالجة مسبقة، لدرجات حرارة مرتفعة في أفران خاصة، وأفضل درجة حرارة معالجة هي 850°C لمدة 3 ساعات.
- تبين أن إضافة الغضار المكلسن إلى التربة الغضارية المحسنة بالكلس، ضمن التركيبات المزجية المقترحة في هذه الدراسة يحسن خواص القوام بشكل كبير لهذه التربة، ويخفض الرطوبة المثالية (OMC) ويزيد من الكثافة الجافة العظمى (MDD) و يحسن خواص المتانة بشكل كبير من خلال رفع قيمة مقاومة الضغط غير المحصور وفق محور واحد (UCS)، وزيادة نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR)، نسبة الإضافة المزجية الفضلى هي6% كلس و 20% غضار مكلسن للتربة الغضارية المختبرة في هذا البحث .

التوصيات:

- إضافة الغضار المكلسن لوحده أو بالمشاركة مع الكلس أو المزج بينهما لتحسين الترب الغضارية التي تشكل تربة الأساس للمنشآت المختلفة سواء في مشاريع الطرق أو الأبنية، وذلك حسب أهمية المشروع.
- إنتاج تركيبة مزجية من الكلس والغضار المكلسن بشكل تجاري ضمن أكياس مختومة وبنعومة محددة على غرار إنتاج الاسمنت، مخصصة لتحسين تربة أساسات الطرق والأبنية.
- التوسع في دراسة إنتاج الغضار المكلسن من ترب غضارية محلية، من خلال دراسة الخواص المنرولوجية للمنتج الجديد باستخدام تقنيات التحليل الدقيق، كالمجهر الالكتروني والـ (XRD)، وغيرها من أجهزة التحليل الدقيق المتوفرة محلياً.

المراجع:

[1] MALLELA, J; HAROLD, V. Q. P; SMITH, K.L. *Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design*. Arlington, Virginia, USA: The National Lime Association; 2004.

[2] BELL, F. G. *Lime stabilization of clay soils*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Springer Berlin Heidelberg 1989,Vol 39, N°1: 67-74.

[3] AL-SWAIDANI. A; HAMMOUD. I; MEZIAB. A. *Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Elsevier, Netherlands . 2016, Vol 8, N° 5: 714-725.

[4] BELL, F. G. *Lime stabilization of clay minerals and soils*. Engineering Geology. Elsevier,Netherlands 1996, Vol 42, N° 4, 223-237.

[5] KASSIM, K.A; CHERN, K. K. *Lime stabilized Malaysian cohesive soils*. Journal of Engineering, the National University of Malaysia 2004, Vol 16 N°1:13-23.

[6] RAO, S. M; SHIVANANDA, P. *Compressibility behavior of lime-stabilized clay*. Geotechnical and Geological Engineering, Springer, Berlin Heidelberg. 2005, Vol 23 N°3: 309-319.

[7] SAKR, M. A; SHAHIN. M. A; METWALLY, Y. M. *Utilization of lime for stabilization soft clay soil of high organic content*. Geotechnical and Geological Engineering, Springer, Berlin Heidelberg, 2009, Vol 27 N°1: 105-113.

[8] GHOBADI, M. H; ABDILOR. Y; BABAZADEH. R. *Stabiliztion of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Springer Berlin Heidelberg 2014; Vol73 N°2: 611-619.

[9] HARICHANE, K; GHRICI, M; KHEBIZI, W; MISSOUM, H; *Effect of the Combination of Lime and Natural Pozzolana on the Durability of Clayey Soils*, EJGE, USA, 2012, Vol 15, Bund. L:1194-1210.

[10] ZOUBIR, W; HARICHANE, K; GHRICI, M; *Effect of Lime and Natural Pozzolana on Dredged Sludge Engineering Properties*, EJGE, USA, 2013, Vol 18, Bund. C: 589-600.

[11] LAUGHLIN, R. G. *The Effect of Thermal Treatment on the Engineering Proper ties Of Clays,* Highway Materials Research Laboratory Lexington, Kentucky, USA, 1959 , 41

[12] ILIĆ, B. R; MITROVIĆ, A. A; MILIČIĆ. L. R, *Thermal Treatment Of Kaolin Clay To Obtain Metakaolin*, Institute for Testing of Materials, Belgrade, Serbia, Scientific Paper, 2010, Vol 64, N°4:351–356.

[13] MECHTI, W; MNIF ,T ; SAMET, B ; ROUIS. M. J. *Effects Of The Secondary Minerals On The Pozzolanic Activity Of Calcined Clay: Case Of Quartz*, IJRRAS 2012,Vol12 :1, 61-71.

[14] FITOS, M; BADOGIANNIS, E.G; TSIVILIS, S.G; PERRAKI, M. *Pozzolanic activity of thermally and mechanically treated kaolins of hydrothermal origin*, Applied Clay Science, Elsevier, Netherlands 2015, Vol:116–117 , 182–192.

[15]ABED, A. *Numerical Modling Expansive soil Behavior,* PhD Thesis, shtuttgart University, Germany 2008, 216

[16] EN 197-1:2000, *composition specifications and conformity criteria for common cements*, 2000, 8-9.

[17] LIME-TREATED SOIL CONSTRUCTION MANUAL, *Lime Stabilization and Lime Modification*, National lime Association, USA 2004, 41.

[18]. SAYANAM, R.A; MEHTA. S. K; KALSOTRA, K. *Studies on the lime reactivity with thermally activated clay from Jammu Region (India)*. Journal of Thermal Analysis, Springer Berlin Heidelberg 1991, Vol 37 N°1 :11-17.

[19] EN 196-1, *Methods of Testing Cement: Part 1. Determination of Strength*, European Committee for standardization, Brussels (1995), 71.

[20] MASSAZZA, F. *Pozzolanic cements*., Cement and Concrete Composites, Elsevier, Netherlands 1993, Vol15, N°4: 185-214

[21] KENNETH. L. B, ANDREW .G. B. *Iowa Thickness Design Guide for Low Volume Roads Using Reclaimed Hydrated Class C Fly Ash Bases*. Transportation Conference Proceeding. 1998, 253-258.