

تأثير زمن المعالجة على خواص الدمك للتربة الطينية المحسنة برمل الكسارات
<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-md19>

Received	2026/09/27	تم استلام الورقة العلمية في
Accepted	2026/10/18	تم قبول الورقة العلمية في
Published	2026/10/19	تم نشر الورقة العلمية في

تأثير زمن المعالجة على خواص الدمك للتربة الطينية المحسنة برمل الكسارات

معمر محمد الغويل¹، عبد المنعم مصطفى السوقي²، إبراهيم الهادي خالد³

قسم الهندسة الإنشائية - كلية التقنية الهندسية - مسلاته - ليبيا

mohamadoamar8@gmail.com

ORCID 0009-0000-8447-047X

الملخص

تُعد التربة الطينية عالية اللدونة تحدياً كبيراً في المشاريع الهندسية نظراً لخصائصها غير المستقرة وقابليتها العالية للتغيرات الحجمية. يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير إضافة رمل الكسارات بنسب مختلفة (10% و 20%) وتأثير زمن المعالجة (0، 3، و 7 أيام) على خواص الدمك للتربة الطينية. أظهرت النتائج المختبرية أن إضافة رمل الكسارات أدت إلى تحسن ملحوظ في الخصائص الفيزيائية للتربة، حيث انخفض مؤشر اللدونة (PI) من 33% في العينة الأصلية إلى 23% و 22% عند إضافة 10% و 20% (رمل كسارات) على التوالي، مما أدى إلى تغيير تصنيف التربة من طين عالي اللدونة (CH) إلى طين منخفض اللدونة (CL). كما لوحظ تحسن في معاملات الدمك عند الدمك المباشر (زمن معالجة 0 يوم)، حيث ارتفعت أقصى كثافة جافة (MDD) وانخفض المحتوى المائي الأمثل (OMC). ومع ذلك، أظهرت نتائج اختبارات الدمك أن زيادة زمن المعالجة (التأخير في الدمك) أدت إلى انخفاض تدريجي في أقصى كثافة جافة وزيادة تدريجية في المحتوى المائي الأمثل. وقد وُجد أن نسبة الانخفاض في الكثافة الجافة القصوى كانت أكبر عند إضافة 20% مقارنة بـ 10% مع مرور الوقت. وبناءً على هذه النتائج، يُوصى باستخدام خليط 20% رمل كسارات لمشاريع الأحمال المتوسطة إلى الثقيلة بشرط إجراء عملية الدمك مباشرة بعد الخلط لتجنب التدهور في الخصائص الناتج عن تأخير الدمك.

الكلمات المفتاحية: التربة الطينية، رمل الكسارات، زمن المعالجة، خواص الدمك، أقصى كثافة جافة، المحتوى المائي الأمثل، مؤشر اللدونة.

Effect of curing time on compaction properties of clay soil improved with quarry sand

**Muamar Mohamed Alghwel, Abdulmunam Mustafa Esuqi,
Ibrahim Elhadi Khaled**

Department of Constructional Engineering-Faculty of Engineering
Technique-Msallatah-Libya
mohamadoamar8@gmail.com
ORCID 0009-0000-8447-047X

Abstract

High plasticity clayey soils present significant challenges in engineering projects due to their unstable properties and high susceptibility to volumetric changes. This study investigates the effect of adding quarry sand at different percentages (10% and 20%) and the effect of curing time (0, 3, and 7 days) on the compaction properties of clayey soil. The laboratory results showed that the addition of quarry dust significantly improved the physical properties of the soil. The Plasticity Index (PI) decreased from 33% in the natural sample to 23% and 22% with the addition of 10% and 20% quarry sand, respectively, changing the soil classification from High Plasticity Clay (CH) to Low Plasticity Clay (CL). Compaction parameters also improved at zero curing time (immediate compaction), showing an increase in Maximum Dry Density (MDD) and a decrease in Optimum Moisture Content (OMC). However, the results of the compaction tests indicated that increasing the curing time (delay in compaction) led to a gradual decrease in the MDD and a gradual increase in the OMC. The rate of decrease in the MDD was found to be greater for the 20% addition compared to the 10% addition over time. Based on these findings, it is recommended to use a mixture of 20% quarry dust for medium to heavy load projects, provided that the compaction process is carried out immediately after mixing to avoid the deterioration of properties caused by delaying the compaction.

Keywords: Clayey Soil, Quarry Dust, Curing Time, Compaction Properties, Maximum Dry Density, Optimum Moisture Content, Plasticity Index.

1. مقدمة البحث والدراسات السابقة

تشكل التربة الطينية الضعيفة ذات اللدونة العالية إحدى أبرز العقبات الجيوتقنية شيوياً وتأثيراً في مشاريع الطرق، والأساسات، والمنشآت الأرضية، إذ تتسم هذه التربة بمؤشر لدونة مرتفع يعكس حساسيتها العالية للتغيرات الرطوبية، وما يتبع ذلك من عمليات انتفاخ وانكماش دورية، فضلاً عن تدني مقاومتها للقص، وانخفاض قدرتها التحميلية، وارتفاع قابليتها للانضغاط والهبوط. وتُصنف التربة قيد الدراسة في هذا البحث بالتربة الطينية عالية اللدونة (CH) وفقاً للنظام الموحد لتصنيف التربة (USCS)، وبمؤشر لدونة يبلغ $PI = 33\%$ وتُشير هذه القيمة المرتفعة إلى وجود إشكاليات هندسية جوهرية تتطلب التدخل الفني لإيجاد حلول معالجة وتثبيت فعالة ومستدامة.

وفي هذا السياق، يُعدّ التثبيت باستخدام المواد الحبيبية من أكثر الأساليب الجيوتقنية كفاءة واقتصادية لتحسين الخواص الهندسية للتربة الطينية، لا سيما في المناطق التي تتوفر فيها هذه المواد كعائد ثانوي أو نواتج جانبية لصناعات تكسير الصخور (الكسارات). ويبرز رمل الكسارات (Quarry Dust) كبديل واعد نظراً لامتلاكه كثافة نوعية مرتفعة ($G_s = 2.69$)، وتدرجاً حبيبياً يجمع بين الرمل بنسبة 75% والدقائق الناعمة بنسبة 25%؛ حيث يهيئ هذا التوزيع الحبيبي المادة للعمل كمخمد للفراغات البينية ضمن الهيكل الطيني، مما يُعزز من خصائص الدمك وجودته.

وتتفق هذه الآلية الفيزيائية مع ما أسسه Koerner (1984)؛ حيث أثبت أن إضافة نسب متزايدة من الرمل إلى الطين تؤدي إلى إزاحة تدريجية في منحني الدمك نحو قيم كثافة جافة أعلى ومحتوى مائي مثالي أدنى، وهو ما أكدته كذلك دراسة Soosan et al (2005) التي عزت هذا التحسن إلى الكثافة النوعية المرتفعة والطبيعة غير المسامية للرمل مقارنة بالطين. وينعكس هذا التحسن الجوهري في خصائص الدمك على سلوك اللدونة؛ إذ أشار Chetia et al (2017) إلى أن إضافة رمل الكسارات ترافقها تقاعلات تؤدي إلى انخفاض حدود أتربرغ (Atterberg Limits)، مما يُقلص من لدونة التربة وقابليتها للانتفاخ تدريجياً مع زيادة نسبة الإضافة. ولدور الدقائق الناعمة المصاحبة أهمية

تأثير زمن المعالجة على خواص الدمك للتربة الطينية المحسنة برمل الكسارات
<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-md19>

بالغة؛ إذ وضح Sridharan & Nagaraj (2005) أن المواد الحبيبية الحاوية على نسب من الدقائق الناعمة (كالطمي والغبار) تُسهم في ملء الفراغات البينية بين الحبيبات الخشنة بفاعلية تفوق استخدام الرمال النقية، وهو ما يُفسر التحسينات الملحوظة الناتجة عن رمل الكسارات المستخدم في هذا البحث والحاوي على الدقائق الناعمة. وفي هذا الصدد أشار Etim et al (2021) إلى أن الحبيبات الدقيقة للغاية (Micro-sized) لرمل الكسارات تعمل على تحسين البنية المجهرية للتربة عبر سد الفجوات البينية، مما يرفع من مقاومة القص. وتتجلى هذه الفائدة التطبيقية في أعمال رصف الطرق. ومع ذلك، فإن التقييم الشامل لفاعلية التثبيت لا ينبغي أن يقتصر على الاستجابة الآنية واللحظية للخلط، بل يجب أن يمتد ليلتبع التطور الزمني للخصائص الهندسية مع تقدم زمن المعالجة (Curing time) وقد وثّق Ahnberg et al (1995) وباحثون آخرون أن التفاعلات الفيزيوكيميائية في الأطياف المعالجة بالمواد المعدنية تستمر لأسابيع وأشهر؛ نتيجة عمليات إعادة توجيه الجسيمات، والتبادل الأيوني، وتعديل الطبقة المزدوجة المنتشرة. (Diffuse Double Layer).

وفي ذات الإطار، درس Firat et al (2017) تأثير فترات المعالجة (1، و7، و28 يوماً) على التربة المثبتة بمخلفات الرمل والرخام، ولوحظ أن الخواص الهندسية تتغير بشكل ملحوظ خلال الأسبوع الأول نتيجة لإعادة توزيع الرطوبة والتفاعلات البطيئة. كما عززت دراسة Bell (1996) هذا الطرح بإثباتها أن منحني الدمك يتأثر زمنياً بشكل ملحوظ في التربة المثبتة بمرور وقت المعالجة.

إلا أن هذا التطور الهندسي المرتبط بمخلفات الكسارات يظل حساساً لظروف التطبيق؛ حيث أكد Amadi & Osu (2018) أن نمو القوة والكثافة في هذه المخاليط يعتمد بشكل وثيق على زمن المعالجة وظروف الرطوبة المحيطة، محذرين من أن أي تأخير في عملية الدمك قد يؤدي إلى تغيرات غير مرغوبة في الكثافة الجافة المستهدفة ويؤثر سلباً على جودة التثبيت.

تأسيساً على ما تقدم، تتبلور أهمية هذا البحث في تقديم توصيف تفصيلي لمنحنيات الدمك للتربة الطينية المعالجة برمل الكسارات، وتحليل تأثير نسب الإضافة المختلفة على معاملات الدمك الرئيسية، مع صياغة فهم علمي متكامل للتوقعات الزمنية المرتبطة بفترات

تأثير زمن المعالجة على خواص الدمك للتربة الطينية المحسنة برمل الكسارات
<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-md19>

المعالجة وأثرها على استقرارية التربة وتطور خواصها الجيوتقنية تحت ظروف التشغيل المختلفة.

2. المشكلة البحثية

1.2 الخلفية العامة للتحدي الهندسي

تُعد التربة الطينية من أكثر أنواع التربة تحدياً في الهندسة الجيوتقنية ومجال البناء، نظراً لخصائصها غير المستقرة التي تشمل ارتفاع حد اللدونة، وضعف مقاومة القص، وقابليتها العالية للتغيرات الحجمية (الانتفاخ والانكماش) عند تغير المحتوى المائي، مما يؤدي إلى انخفاض قدرتها على تحمل الأحمال. هذه الخصائص تجعلها غير صالحة كطبقة تأسيس دون معالجة مسبقة. وللتغلب على هذه التحديات الهندسية، يُعد إضافة "رمل الكسارات" (Quarry Dust) تقنية فعالة واقتصادية تساهم في خفض لدونة التربة وتعزيز قدرة تحملها.

2.2 إشكالية البحث والفجوة المعرفية

تعتمد جودة الاعمال الترابية بشكل أساسي على كفاءة عملية الدمك، والتي تهدف إلى الوصول لأقصى كثافة جافة (MDD) بأقل محتوى مائي أمثل (OMC). على الرغم من الفوائد المعروفة لخلط رمل الكسارات مع التربة الطينية، إلا أن فعالية التحسين لا تتوقف فقط على نسب الإضافة، بل تتأثر بشكل كبير علي زمن الخلط
تكمّن الفجوة المعرفية في الآتي:

- 1) أثبتت الدراسات السابقة أن تأخير عملية الدمك للتربة المحسنة بالمواد الكيميائية (مثل الجير والأسمنت) يؤدي إلى تكوين تكتلات وتجمعات لجزيئات الطين، مما يقلل الكثافة الجافة القصوى ويزيد من محتوى الرطوبة الأمثل، ويؤثر سلباً على بنية التربة.
- 2) هناك نقص واضح في الأبحاث التي تتناول أثر تأخير الدمك (الفترة بين الخلط والدمك) على السلوك التربة الطينية المحسنة تحديداً بـ "رمل الكسارات".

3.2 التساؤلات البحثية

1. كيف يؤثر تغيير زمن المعالجة (0، 3، 7 يوم) بعد خلط التربة الطينية برمل الكسارات على الكثافة الجافة القصوى (MDD) ومحتوى الرطوبة الأمثل (OMC)؟

2. هل يؤدي التأخير الزمني إلى استقرار الحبيبات الخشنة لرمل الكسارات وتسهيل انزلاق الحبيبات الطينية، أم أنه يسبب تكوين تكتلات تقلل من كفاءة الدمك النهائية للخطأ؟
3. هل تحافظ نسب الإحلال (10% و 20%) على خصائصها المثلى عند تأخير الدمك أم تتأثر بشكل سلبي؟
4. ما هو الزمن الأمثل للدمك (Optimum Delay Time) الذي يجب اعتماده بعد الخلط للحصول على أفضل خصائص هندسية؟

4.2 أهمية الدراسة (البعد الهندسي والبيئي)

يفتقر المهندسون والمقاولون لبروتوكولات واضحة تحدد "الزمن الأمثل للدمك". سيوفر هذا البحث فهماً أعمق للسلوك الزمني للخلطات الطينية-الرملية، مما يساعد على تحديد الجدول الزمني الأمثل لعمليات الخلط والدمك. وبالتالي، سيسهم ذلك في تجنب تدهور خصائص التربة الناتج عن التأخير غير المدروس، وتقليل التكاليف الإنشائية، فضلاً عن دعم الاستدامة البيئية عبر الاستفادة المثلى من نفايات رمل الكسارات بدلاً من تراكمها كملوثات بيئية.

3. المواد والمنهجية التجريبية

1.3 المواد

1.1.3 التربة الطينية

جمعت التربة الطينية من منطقة العمود شرق مدينة مسلاته وخضعت لمجموعة من الاختبارات المعملية وفقاً لمواصفات ASTM، يلخص الجدول (1) خصائصها الجيوتقنية الرئيسية.

الجدول (1) الخصائص الجيوتقنية للتربة الطينية الطبيعية

الخاصية	القيمة	المواصفة
حصي %	0%	ASTM D422
رمل %	16%	ASTM D422
(طين + طمي) %	84%	ASTM D422

تأثير زمن المعالجة على خواص الدمك للتربة الطينية المحسنة برمل الكسارات
<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-md19>

الموصوفة	القيمة	الخاصية
ASTM D4318	62%	حد السيولة LL
ASTM D4318	29%	حد اللدونة PL
ASTM D4318	33%	مجال اللدونة PI
ASTM D854	2.58	الكثافة النوعية GS
USCS	طين عالي اللدونة (CH)	التصنيف الموحد USCS

تتسم هذه التربة بمحتوي طمي طيني عالي (84%) وحد سيولة مرتفع (62%) ومجال لدونة واسع (33%) وكثافة نوعية (2.58)، تصنف هذه القيم ضمن مؤشرات التربة ذات السلوك الانتفاخي والانكماشى المرتفع (CH) وفق مخطط اللدونة لكاراجراند.

2.1.3 رمل الكسارات

يمثل رمل الكسارات المادة المحسنة المستخدمة في هذا البحث، وهو ناتج عن عمليات تكسير الحجر من كسارات منطقة العلوص غرب مدينة مسلاتة. الجدول (2) يبين الخواص الجيوتقنية لرمل الكسارات المستخدم.

الجدول (2) الخصائص الجيوتقنية لرمل الكسارات

الموصوفة	القيمة	الخاصية
ASTM D422	75%	رمل % (4.75mm-75µm)
ASTM D422	25%	طمي وطين % (< 75µm)
ASTM D4318	Nil	حد السيولة LL
ASTM D4318	NP	حد اللدونة PL
ASTM D854	2.69	الكثافة النوعية GS
USCS	رمال طينية (SM)	التصنيف الموحد USCS

تأثير زمن المعالجة على خواص الدمك للتربة الطينية المحسنة برمل الكسارات
<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-md19>

يصنف رمل الكسارات المستخدم ضمن الرمال الطينية (SM) نظرا لمحتواه من الحبيبات الناعمة (25%) طمي وطين، يتميز رمل الكسارات بعدم اللدونة (NP).

2.3 المنهجية التجريبية

اتبعت البحث منهجية معملية تجريبية تشمل المراحل التالية:

المرحلة الاولى: الاعداد والتجفيف، جمعت التربة الطينية وجففت بالهواء ثم طحنت وغربت على منخل 4.75 mm لإزالة الحصى. جمع رمل الكسارات وخزن في ظروف جافة مع مراقبة دقيقة للرطوبة الطبيعية.

المرحلة الثانية: التوصيف الكامل، أجريت اختبارات التحليل المنخلي لكل من التربة الطينية الطبيعية ورمل الكسارات والمخاليط حسب (ASTM D422) واختبارات حدود القوام حسب (ASTM D4318) واختبار الكثافة النوعية حسب (ASTM D854).

المرحلة الثالثة: عداد المخاليط، جهزت خلطتان بنسبة 10% و 20% من رمل الكسارات من الوزن الحاف للتربة الطينية الطبيعية.

المرحلة الرابعة: اختبار الدمك، أجريت اختبارات الدمك القياسي (Standard Proctor Compaction Test) وفقا للمواصفات القياسية (ASTM D698). تم اجراء الاختبارات على الخلائط عند ازمة معالجة مختلفة: 0 يوم (مباشرة بعد الخلط)، 3 أيام، 7 أيام. ثم تحديد أقصى كثافة جافة (MDD) والمحتوي المائي الأمثل (OMC) لكل خليط وعند كل زمن معالجة.

المرحلة الخامسة: تحليل النتائج، رسمت منحنيات الدمك للخلطتين بنسبة إضافة 10% و 20% عند زمن معالجة (0، 3، 7) أيام ومقارنتها واستنتج النسبة المثلى لرمل الكسارات المضاف، أيضا الزمن الأمثل للدمك.

4. النتائج

1.4 الخصائص الفيزيائية للتربة الطينية والخلائط

أظهرت نتائج اختبارات حدود أتربرج أن إضافة رمل الكسارات كان لها تأثير إيجابي في تحسين خصائص اللدونة للتربة الطينية، حيث انخفضت قيم كل من حد السيولة (LL) وحد اللدونة (PL) ومعامل اللدونة (PI) بصورة تدريجية مع زيادة نسبة الإضافة.

تأثير زمن المعالجة على خواص الدمك للتربة الطينية المحسنة برمل الكسارات
<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-md19>

فقد انخفض حد السيولة من 62% للتربة الطبيعية إلى 44% عند إضافة 10% من رمل الكسارات، ثم إلى 39% عند زيادة نسبة الإضافة إلى 20%. كما انخفض حد اللدونة من 29% للتربة الطبيعية إلى 21% و 17% عند نسبي الإضافة 10% و 20% على التوالي، وهو ما انعكس في انخفاض واضح في معامل اللدونة، مما يشير إلى تراجع قابلية التربة للتشوه اللدن عند تغير المحتوى المائي.

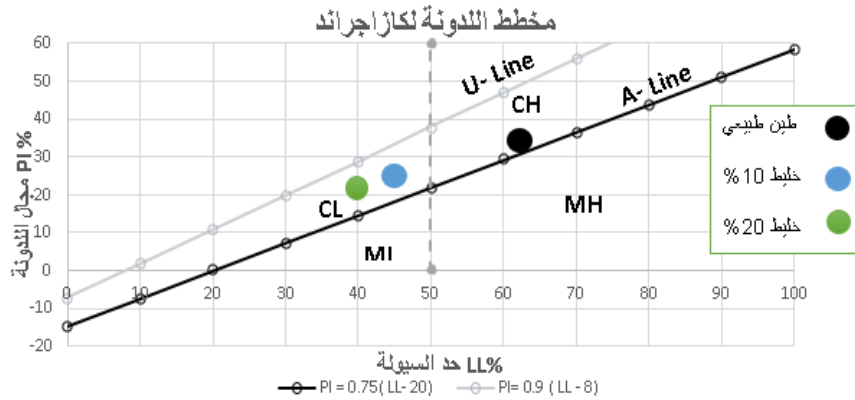
ويُعزى هذا السلوك إلى استبدال جزء من الحبيبات الطينية الدقيقة ذات النشاط العالي بحبيبات رملية خشنة غير لدنة، الأمر الذي أدى إلى تقليل المساحة السطحية النوعية للخليط وخفض قدرته على امتصاص الماء، وبالتالي الحد من تأثير المعادن الطينية في السلوك اللدن للتربة. ويؤكد ذلك الدور الفعال لرمل الكسارات في تعديل الخصائص الفيزيائية للتربة وتحسين سلوكها الجيوتقني.

ويعرض الجدول (3) الخصائص الفيزيائية للتربة الطينية، والخلاط الناتجة، بالإضافة إلى تصنيفها وفق نظام التصنيف الموحد للتربة. (USCS) كما يوضح الشكل (1)، من خلال تمثيل قيم حد السيولة ومعامل اللدونة على مخطط كازاجراندي (Casagrande Plasticity Chart)، انتقال تصنيف التربة من طين عالي اللدونة (CH) إلى طين منخفض اللدونة (CL) مع زيادة نسبة رمل الكسارات. ويُعد هذا التغير دليلاً على انخفاض درجة لدونة التربة وتحسن خصائصها الهندسية، بما يسهم في رفع قابليتها للتشغيل والدمك ويزيد من ملاءمتها للاستخدام في تطبيقات الهندسة الجيوتقنية المختلفة.

الجدول (3) الخصائص الفيزيائية للتربة الطينية والخلائط عند 0 يوم

الخاصية	التربة الطينية الأصلية	خليط 10% رمل	خليط 20% رمل
الكثافة النوعية GS	2.58	2.59	2.61
حد السيولة % LL	62	44	39
حد اللدونة % PL	29	21	17
معامل اللدونة PI%	33	23	22
تصنيف التربة USCS	CH	CL	CL

تأثير زمن المعالجة على خواص الدمك للتربة الطينية المحسنة برمل الكسارات
<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-md19>



الشكل (1) مخطط اللدونة لكازجراند

2.4 تأثير زمن المعالجة على خواص الدمك للخلائط.

تُبين نتائج اختبارات الدمك أن زمن المعالجة له تأثير واضح في خصائص الدمك للخلائط المحتوية على رمل الكسارات بنسبة (10% و 20%). فقد لوحظ انخفاض تدريجي في قيمة أقصى كثافة جافة (Maximum Dry Density, MDD) مع زيادة زمن المعالجة، في حين سجل المحتوى المائي الأمثل (Optimum Moisture Content, OMC) زيادةً تدريجية خلال الفترات نفسها.

وتشير هذه النتائج إلى أن الخلائط تصبح أقل قابلية للدمك مع تقدم زمن المعالجة، الأمر الذي يتطلب محتوى مائياً أعلى للوصول إلى أقصى كثافة جافة تحت طاقة الدمك القياسية. ويمكن تفسير هذا السلوك بحدوث تغيرات في البنية الداخلية للخليط أثناء فترة المعالجة، تتمثل في إعادة ترتيب الحبيبات وزيادة التفاعل والتماسك بينها، مما يؤدي إلى زيادة مقاومة الحبيبات لإعادة الانضغاط وانخفاض الكثافة الجافة العظمى. وفي الوقت نفسه، تزداد حاجة الخليط إلى الماء لتسهيل حركة الحبيبات وتقليل الاحتكاك الداخلي بينها، وهو ما ينعكس في ارتفاع قيم المحتوى المائي الأمثل، ويوضح الجدول (4) نتائج اختبارات الدمك للخلائط عند أزمنة المعالجة المختلفة، مبيئاً التغير في قيم الكثافة الجافة العظمى والمحتوى المائي الأمثل لكل نسبة من نسب إضافة رمل الكسارات.

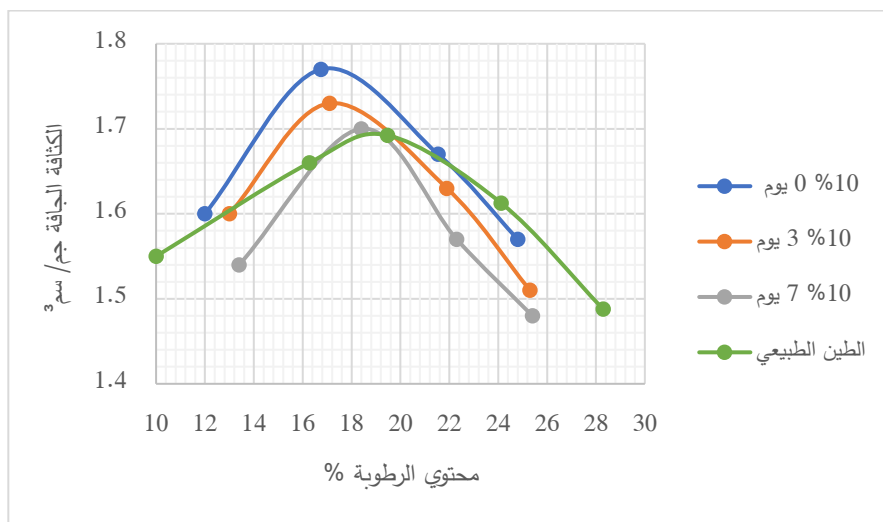
تأثير زمن المعالجة على خواص الدمك للتربة الطينية المحسنة برمل الكسارات

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-md19>

الجدول (4) نتائج اختبارات الدمك للخلائط عند أزمنة المعالجة المختلفة

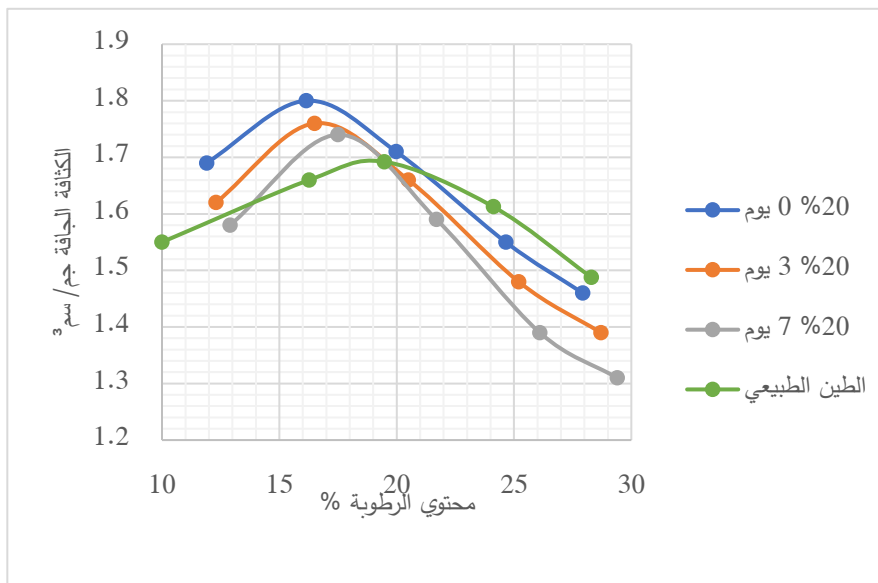
OMC %	MDD	OMC %	MDD	OMC	MDD	زمن
خليط	(g/cm ³)	خليط	(g/cm ³)	%	(g/cm ³)	المعالجة
	خليط		خليط	طين	طين	(يوم)
		طين+10%رمل	طين+10%رمل	طبيعي	طبيعي	
16.14	1.80	16.75	1.77	19.47	1.69	0
16.5	1.76	17.1	1.73	-----	-----	3
17.5	1.74	18.4	1.70	-----	-----	7

الشكل (2) والشكل (3) يبينان منحنيات الدمك القياسية للتربة الطينية والخلائط (10% و 20% رمل كسارات مع أزمنة المعالجة المختلفة).



الشكل (2) منحنيات الدمك القياسية للتربة الطينية ولخليط التربة المعالجة 10% رمل الكسارات مع أزمنة المعالجة المختلفة.

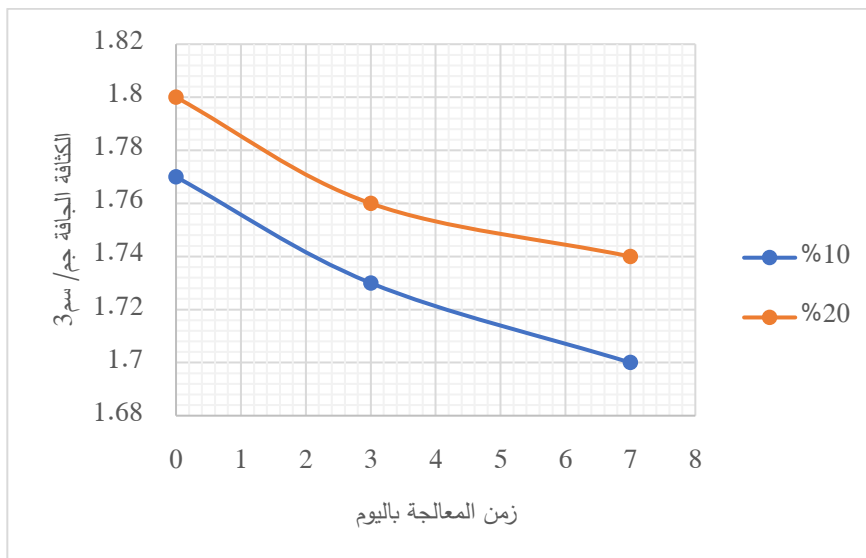
تأثير زمن المعالجة على خواص الدمك للتربة الطينية المحسنة برمل الكسارات
<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-md19>



الشكل (3) منحنيات الدمك القياسية للتربة الطينية وخليط التربة المعالجة 20% رمل الكسارات مع أزمنة المعالجة المختلفة.

ويبين الشكل (4) تأثير زمن المعالجة على الكثافة الجافة القصوى (MMD) لنسبتي الخلط فكانت أقصى كثافة جافة للخليط 10 % عند زمن معالجة 0 يوم 1.77 g/cm^3 وانخفضت عند زمن معالجة 3 يوم فكانت 1.73 g/cm^3 (بنسبة انخفاض 2.26 %) وانخفضت عند زمن معالجة 7 يوم فكانت 1.70 g/cm^3 (بنسبة انخفاض 3.95 %). وكانت أقصى كثافة جافة للخليط 20 % عند زمن معالجة 0 يوم 1.80 g/cm^3 وانخفضت عند زمن معالجة 3 يوم فكانت 1.76 g/cm^3 (بنسبة انخفاض 2.22 %) وانخفضت عند زمن معالجة 7 يوم فكانت 1.74 g/cm^3 (بنسبة انخفاض 3.33 %). تشير النتائج إلى اتجاه تناقصي واضح في الكثافة الجافة القصوى مع ازدياد زمن المعالجة، مع ملاحظة أن معدل الانخفاض أكبر عند خليط 20% رمل كسارات مقارنة بالخليط 10%.

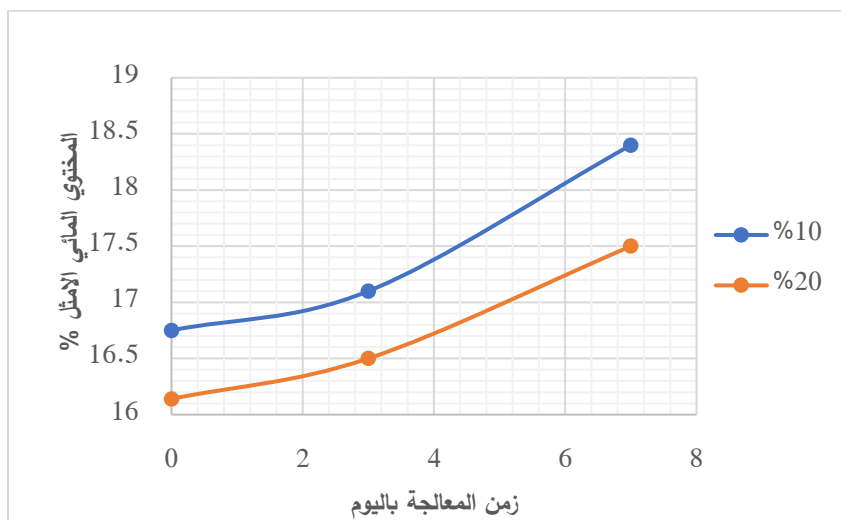
تأثير زمن المعالجة على خواص الدمك للتربة الطينية المحسنة برمل الكسارات
<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-md19>



الشكل (4) تأثير زمن المعالجة على أقصى كثافة جافة.

يبين الشكل (5) تأثير زمن المعالجة على المحتوى المائي الأمثل (OMC) اللازم لتحقيق أقصى كثافة جافة لنسبتي الخلط 10% و 20%. للخليط 10% قيمة OMC 16.75% عند زمن معالجة 0 يوم. بعد 3 أيام ازداد OMC إلى 17.1%، وهو ما يمثل زيادة نسبتها 2.08%، واستمر الارتفاع ليصل إلى 18.4% بعد 7 أيام (زيادة نسبتها 9.85%). وبالنسبة للخليط 20%، كان OMC عند زمن معالجة 0 يوم 16.14%، فارتفع إلى 16.50% بعد 3 أيام (زيادة نسبتها 2.23%) وإلى 17.5% بعد 7 أيام (زيادة نسبتها 8.42%). تشير هذه النتائج إلى ارتفاع تدريجي في المحتوى المائي الأمثل مع ازدياد زمن المعالجة، مع ملاحظة أن نسبة الزيادة أكبر للخليط 10%.

تأثير زمن المعالجة على خواص الدمك للتربة الطينية المحسنة برمل الكسارات
<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-md19>



الشكل (5) تأثير زمن المعالجة على المحتوى المائي الأمثل

5. الاستنتاجات

علي ضوء النتائج يمكن استخلاص الاستنتاجات التالية:

- تشير النتائج إلى أن إضافة رمل الكسارات كمادة محسنة إلى التربة الطينية تؤدي إلى تحسين تصنيفي واضح، حيث تحول الطين من فئة ذات لدونة عالية (CH) إلى فئة ذات لدونة منخفضة (CL). ينعكس ذلك في الانخفاض الملحوظ لمؤشر اللدونة (PI) من 33% في العينة الطينية الأصلية إلى 23% و 22% عند خلط 10% و 20% رمل كسارات على التوالي، ما يدل على تحسن سلوك التربة من ناحية المرونة والتشوه.
- أدت إضافة رمل الكسارات إلى تحسين مؤشرات الدمك للتربة الطينية: ارتفعت أقصى كثافة جافة (MDD) من 1.69 جم/سم³ للطين الطبيعي إلى 1.77 جم/سم³ عند إضافة 10% رمل كسارات وإلى 1.80 جم/سم³ عند إضافة 20% رمل كسارات. وبالمقابل، انخفض المحتوى المائي الأمثل (OMC) من 19.47% في العينة الأصلية إلى 16.75% و 16.14% لنسب الخلط 10% و 20% على التوالي عند زمن المعالجة 0 يوم (أي مباشرة بعد الخلط). هذه التغيرات تشير إلى قدرة الخليط على تحقيق كثافة أعلى عند محتويات مائية أقل، مما ينعكس إيجابياً على متطلبات عمليات الدمك وسلوكية التربة الحقلية.

6. التوصيات

يقدم استخدام رمل الكسارات كمادة تثبيت للتربة مزايا اقتصادية وبيئية متعددة، من حيث توافر المادة كنتاج ثانوي مجاني المنخفض التكلفة، أيضا تقليل كميات الطين الضعيف المطلوب ازالته من الموقع مع المساهمة في استدامة موارد المحاجر بتوظيف نواتجها الثانوية بدلا من التخلص منها. ولهذا نوصي بالتالي:

1. يوصي باستخدام خليط 20% رمل كسرة لطبقات الردم المعرضة لأحمال متوسطة الي ثقيلة نظرا لأعلى قيمة MMD وهي (1.8 g/cm^3) وادني قيمة OMC وهو 16.14% مع الحرص أن يكون الدمك بعد الخلط مباشرة.
2. يمكن استخدام خليط 10% رمل كسارات للمشاريع ذات المتطلبات المتوسطة والاقبل أحمال.
3. نوصي بإجراء أبحاث أكثر تفصيلا حول تأثير زمن المعالجة للتربة الطينية المحسنة برمل الكسارات على مقاومة القص والانتفاخ والانكماش.

7. المراجع

- Ahnberg, H., Johansson S.E., Pihl, H., Carlsson, T. (1995). Stabilizing Effects of Different Binders in Some Swedish Soils. Proceedings, ICE – Ground Improvement, 7(1), 9-23.
- Amadi, A. A., & Osu, A. S. (2018). Effect of curing time on strength development in black cotton soil-quarry fines composite stabilized with cement kiln dust (CKD).
- Bell, F.G. (1996) Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils. Engineering Geology, 42, 223-237.
- Chetia, M., Baruah, M. P., & Sridharan, A. (2017). "Effect of Quarry Dust on Compaction Characteristics of Clay." In Proceedings of the International Congress and Exhibition "Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology", Egypt, 78-89. Springer.
- Etim, R. K., Ekpo, D. U., Attah, I. C., & Onyelowe, K. C. (2021). "Effect of micro sized quarry dust particle on the compaction and strength properties of cement stabilized lateritic soil." Cleaner Materials, 2, 100023.

- Firat, S., Khatib, J., Yilmaz, G., & Cömert, A. T.(2017). Effect of curing time on selected properties of soil stabilized with fly ash, marble dust and waste sand for road sub-base materials.
- Koerner, R. M. (1984). Construction and Geotechnical Engineering Using Synthetic Fabrics and Soil Stabilization. John Wiley & Sons, New York.
- Soosan, T. G., Sridharan, A., Jose, B. T., & Abraham, B. M. (2005). "Utilization of quarry dust to improve the geotechnical properties of soils in highway construction." Geotechnical Testing.Journal, 28(4), 391-400.
- Sridharan, A., Nagaraj, H.B. (2005). Fundamentals of Soil Behavior, 3rd ed. John Wile & Sons, Hoboken, NJ.