



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة قاصدي مرباح ورقلة
كلية العلوم التطبيقية
قسم الهندسة المدنية والري
مذكرة تخرج
ماستر أكاديمي
الميدان: علوم وتكنولوجيا
الفرع: أشغال عمومية
التخصص: طرق ومنشآت فنية
الموضوع:

دراسة جيو تكنولوجية لتقييم وتحسين خصائص تربة السبخة
في منطقة ورقلة

من إعداد:

- نتاري خير الدين
- كربوع علي

اللجنة المكونة من السادة:

UKM	رئيسا	قبائلي مصطفى
UKM	مناقشا	فوجيل إسحاق
UKM	مؤطرا	بوزوايد سامية
UKM	مساعد مؤطر	زنخري عبد الرزاق

السنة الجامعية: 2025/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

إهداء

أهدي عملي هذا:

إلى أبي.

أمي حفظها

الله. إخواني

وإخواتي

إلى كل العائلة كبيرا وصغيرا

إلى كل من ساعدني في إنجاز هذا العمل المتواضع من

أقربائي وأصدقائي ولو بالكلمة الطيبة.

علي

إهداء

إلى الذين وفروا لي كل ما أحتاجه في سبيل إنجاز هذا البحث "أمي"
و"أبي" أطال الله في عمرهما في خير وصحة وهناء وسعادة آمين يا رب.
وسائر أفراد أسرتي.

إلى كل الذين لم يبخلوا علي بعلمهم وجهدهم وتوجيهاتهم إلى
كل هؤلاء أهدي هذا العمل.

خيرالدين

الشكر



نتقدم بخالص الشكر وعظيم الامتنان إلى كل من وقف إلى جانبنا وساندنا طوال فترة إعداد هذه المذكرة.

بداية، نرفع أسمى آيات التقدير والعرفان إلى والدينا الأعزاء، الذين كانوا لنا خير سند، فبدعائهم وتشجيعهم المتواصل وتضحياتهم الجلية استطعنا أن نواصل مسيرتنا التعليمية ونبلغ هذا المقام.

كما نعبر عن جزيل شكرنا وعميق احترامنا للأستاذة بوزوايد سامية على توجيهاتها القيّمة وملاحظاتها البناءة، التي كان لها الأثر الكبير في إخراج هذا العمل في صورته الحالية. ولا يفوتنا كذلك أن نشكر الأستاذ زنجري عبد الرزاق على ما قدمه من دعم علمي ونفسي طيلة فترة إنجاز هذا المشروع، فله منا كل الامتنان.

أتقدم بجزيل الشكر والتقدير إلى أعضاء لجنة المناقشة الأستاذ قبائلي مصطفى والأستاذ فوجيل إسحاق وذلك على قبولهم مناقشة عملي العلمي، وأثنى وقتهم وجهودهم المبذولة في تقييم هذا العمل.

نسأل الله أن يجزي كل من ساعدنا خير الجزاء، وأن يجعل هذا العمل لبنة في مسيرتنا العلمية والمهنية.

تحتل تربة السبخة في ولاية ورقلة مساحات واسعة وتوجد في مواقع استراتيجية ذات أهمية كبيرة، ما يجعل التعامل معها ضرورة ملحة عند تنفيذ مشاريع البنية التحتية والمنشآت والطرق. ورغم التحديات الهندسية التي تفرضها هذه التربة بسبب ضعف الكثافة النسبية، وانخفاض مقاومة القص، وارتفاع الهبوط خاصة في حالة وجود المياه. كما تعتبر كمية المخلفات الضخمة من الزجاج احدى المشاكل التي تهدد البيئة.

تقدم هذه الدراسة الجيوتقنية طريقة مبتكرة لمعالجة وتحسين تربة السبخة باستخدام مزيج من سيليكات الصوديوم ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) وهيدروكسيد الصوديوم (NaOH) بنسب 1:1، 1:2، 1:1.5، مع إضافة نسبة من مسحوق الزجاج الناعم تتراوح بين 10% و20% وزناً.

حيث حققت تحسينات كبيرة في الخواص الميكانيكية والكيميائية. حيث ارتفعت الكثافة الجافة بنسبة **7.3%** حيث شهد زيادة كبيرة ف معامل التحمل الكاليفورنيا الفوري بنسبة (**2270%**) وبعد التشبع بالماء بنسبة **2630%** عند استخدام 20% مسحوق زجاج ونسبة 2:1 السيليكات الصوديوم القلوية، بينما زادت مقاومة القص عبر تحسن زاوية الاحتكاك الداخلي ϕ بنسبة **8.4%** والتماسك (c) بنسبة **496%** عند نفس نسبة المضافة.

باختصار معالجة تربة السبخة بمخلفات الزجاج و السيليكات الصوديوم القلوية ترفع قدرة تحمل تربة المعالجة، مما يجعل تربة السبخة ملائمة للاستخدامات الإنشائية والبنية التحتية.

أخيراً، تتميز طريقة المعالجة بأنها اقتصادية وصديقة للبيئة، وقابلة للتطبيق في المختبر أو في الموقع، وتعتبر بديلاً فعالاً للطرق التقليدية في معالجة الترب الضعيفة أو المالحة.

الكلمات الدالة: تربة السبخة، معالجة التربة، سيليكات الصوديوم القلوية، مسحوق الزجاج، اختبارات

جيوتقنية

Abstract

Sabkha soils in the Ouargla province occupy vast areas and are found in strategically important locations, which makes dealing with them an urgent necessity when implementing infrastructure, construction, and road projects. Despite the engineering challenges posed by these soils due to their low relative density, low shear strength, and high settlement, especially in the presence of water, the large quantities of glass waste also represent one of the environmental problems threatening the region. This geotechnical study presents an innovative method for treating and improving sabkha soils using a mixture of sodium silicate ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) and sodium hydroxide (NaOH) at ratios of 1:1, 1:2, and 1:1.5, with the addition of fine glass powder at a proportion ranging between 10% and 20% by weight. This method achieved significant improvements in the mechanical and chemical properties of the soil. The dry density increased by 7.3%, and there was a substantial increase in the immediate California Bearing Ratio (CBR) by 2270%, and after water saturation by 2630%, when using 20% glass powder and a 1:2 ratio of alkaline sodium silicate. Meanwhile, the shear strength improved, with the internal friction angle (ϕ) increasing by 8.4% and cohesion (c) by 496% at the same additive ratio. In summary, treating sabkha soils with glass waste and alkaline sodium silicate significantly increases the bearing capacity of the treated soil, making sabkha soils suitable for construction and infrastructure uses. Finally, this treatment method is economical, environmentally friendly, and can be applied both in the laboratory and on-site, making it an effective alternative to traditional methods for treating weak or saline soils.

Keywords: Sabkha soil, soil treatment, alkaline sodium silicate, glass powder, geotechnical tests.

قائمة الأشكال

- الشكل 1. 1. منطقة أخذ العينات غرب حي النصر الخفجي ولاية ورقلة..... III
- الشكل 1. 1: الخريطة الجغرافية لمنطقة الدراسة..... IV
- الشكل 1. 2: درجات الحرارة الشهرية القصوى في ورقلة..... IV
- الشكل 1. 3: تساقطات الامطار السنوية لولاية ورقلة لسنة 2007..... V
- الشكل 1. 5: تربة السبخة غرب حي النصر الخفجي ولاية ورقلة..... V
- الشكل 1. 1: السبخات الساحلية بأبوظبي من أكثر الأنواع الموثقة عالميا 2
- الشكل 1. 9: تحضير عينات للتجربة القص 16
- الشكل 1. 10: جهاز القص المباشر 16
- الشكل 1. IV: منحنيات التدرج الحبيبي الخاصة بالعينات 34
- الشكل 1. IV. 4: تغير الكثافة الجافة مسحوق الزجاج + تربة سبخة + 10% Na_2SiO_3 بدلالة محتوى الماء 39
- الشكل 1. IV. 5: تغير الكثافة الجافة للتربة سبخة + 30% Na_2SiO_3 بدلالة محتوى الماء 40
- الشكل 1. IV. 6: تغير الكثافة الجافة للتربة السبخة + 20% Na_2SiO_3 + مسحوق الزجاج 41
- الشكل 1. IV. 8: نتيجة اختبار بروكتور التربة السبخة + 20% مسحوق الزجاج 42
- الشكل 1. IV. 10: تغير الكثافة الجافة للتربة السبخة + 30% مسحوق الزجاج بدلالة 43
- الشكل 1. IV. 11: تغير الكثافة الجافة للتربة السبخة + Na_2SiO_3 بدلالة 44
- الشكل 1. IV. 13: افضل كثافة جافة في تجربة البروكتور القياسي 47
- الشكل 1. IV. 14: أقل محتوى مائي في تجربة البروكتور القياسي 47
- الشكل 1. IV. 15: تغير الكثافة الجافة للتربة بدلالة محتوى الرطوبة مع إضافة مسحوق الزجاج 48
- الشكل 1. IV. 16: منحنى تجربة CBR لتربة السبخة SS 50
- الشكل 1. IV. 18: منحنى تجربة GP CBR + 20% Na_2SiO_3 + 20% SS 52
- الشكل 1. IV. 19: يوضح تأثير إضافة سيليكات الصوديوم ومسحوق الزجاج على نسبة 53
- الشكل 1. IV. 20: يوضح تأثير إضافة سيليكات الصوديوم ومسحوق الزجاج على نسبة 54
- الشكل 1. IV. 21: العلاقة بين إجهاد القص والإجهاد العمودي في اختبار القص المباشر المصرف (Cu) للتربة ss 56
- الشكل 1. IV. 22: العلاقة بين إجهاد القص والإجهاد العمودي في اختبار القص المباشر المصرف (Cu) للتربة ss المعالجة 56
- الشكل 1. IV. 23: العلاقة بين إجهاد القص والإجهاد العمودي في اختبار القص المباشر المصرف (CD) للتربة s المعالجة 57
- الشكل 1. IV. 24: بنية المورفولوجية تربة سبخة قبل المعالجة بتكبير Um200 58
- الشكل 1. IV. 25: بنية المورفولوجية تربة سبخة بعد معالجة بتكبير Um200 59
- الشكل 1. IV. 26: (EDX) لعينة التربة المعالجة 60

الوحدة | مقدمة عامة

- 1.1 المقدمة II
2. الموقع الجغرافي والبيئي لتربة السبخة III
- 2.1 | موقع أخذ العينات III
- 2.2 / الموقع الجغرافي III
- 2.3 | المناخ IV
- 1.3 إشكالية الدراسة V
- 1.4 أهداف الدراسة VI
- 1.5 خطط الدراسة VI

الوحدة | تربة السبخة

- // 1 مقدمة: 1
- // 2 تعريف تربة السبخة: 1
- // 3 أنواع تربة السبخة: 1
- // 3.1 السبخة الساحلية: 2
- // 3.2 السبخة القارية (الداخلية) : 2
- // 4 الخصائص الكيميائية والفيزيائية للتربة سبخة: 3
- // 5 المشاكل البيوتقنية للتربة سبخة: 3

4	6	ظهور مشاكل سطحية في الطرق والمنشآت
4	6.1	طرق معالجة التربة سبخة
5	7	مخلفات الزجاج
5	7.1	مسحوق الزجاج
5	7.2	دور مسحوق الزجاج في تحسين التربة الضعيفة
7	8	سيليكات الصوديوم
7	8.1	تعريف
7	8.2	الخصائص
7	8.3	دور سيليكات الصوديوم في تثبيت التربة السبخية
8	9	ملخص اعمال السابقة على التربة:
10	10	ملاحظات:
10	11	الخاتمة:

الوحدة III الطرق و المنهجية

11	III.1	المقدمة
11	III.2	المواد المستعملة
11	III.2.1.	التربة السبخة
11	III.2.2.	مسحوق الزجاج
12	III.2.2.3	سيليكات الصوديوم

13	اختبار بروكتور المعدل (المعيار NF P 94-093).....	III.3.3
13	اختبار نسبة تحمل كاليفورنيا (NF P 94-078)(CBR)	III.3.4
15	تجربة القص المباشر	III.3.5
17	تجارب الخصائص الكيميائية.....	III.3.6
18	الخاتمة.....	III.4

الوحدة IV النتائج والمناقشة

34	المقدمة.....	IV.1
34	نتائج تحليل التربة السبخة قبل المعالجة	IV.2
34	نتائج التدرج الحبيبي	IV.2.1
36	النتائج الكيميائية.....	IV.2.3
37	نتائج الاختبارات الكيميائية	IV.2.3.2
38	نتائج تحليل التربة السبخة بعد المعالجة.....	IV.3
38	نتائج البروكتور	IV.3.1
49	نتائج تجربة دليل التحمل الكاليفورني (CBR)	IV.3.2
55	نتائج تجربة القص المباشر	IV.3.3
58	النتائج الكيميائية.....	IV.3.4
61	الخاتمة.....	IV.4

الوحدة 1 :

مقدمة عامة

1.1 المقدمة

الترب السبخة من أكثر أنواع الترب تميزاً وانتشاراً في البيئات الجافة وشبه الجافة، خاصة في المناطق الساحلية أو الداخلية المنخفضة التي تتعرض لتأثيرات شديدة من التبخر وتراكم الأملاح الذائبة بالقرب من السطح أو داخله. وتعرف السبخة بأنها مسطح ملحي مستوٍ يتشكل نتيجة تراكم المعادن المبخرة مثل الهاليت (كلوريد الصوديوم)، والجبس (كبريتات الكالسيوم)، والدولوميت، إضافة إلى الطين والكربونات، بفعل تداخل المياه الجوفية المالحة وارتفاع معدلات التبخر مقارنةً بالهطول المطر [6], [2].

تتسم الترب السبخة بخصائص فيزيائية وكيميائية استثنائية؛ فهي غالباً ذات كثافة منخفضة ونفاذية ضعيفة، وتحتوي على نسب عالية من الأملاح الذائبة، ما يجعلها بيئة قاسية للنباتات والبنية التحتية على حد سواء، [4] [3] وتتشكل هذه الترب تحت ظروف جيومورفولوجية وبيولوجية خاصة، حيث يؤدي وجود منسوب مياه جوفية ضحل وغني بالأملاح إلى ترسيب المعادن المبخرة عبر عمليات الصعود الشعري للمياه، خاصة خلال الفترات الجافة، بينما تزداد عملية الإذابة والترسيب مع تغيرات مستوى المياه الجوفية [6], [2].

وتُظهر الدراسات الميدانية والتحليل المعنوية أن الترب السبخة غالباً ما تتكون من خليط من الرمال الناعمة والطين، إضافة إلى نسب متفاوتة من الكربونات (الكالسييت، الدولوميت، الأراجونيت) والسلفات (الجبس، الأنهدريت) والكلوريدات (الهاليت، البيشوفيت)، مع وجود مواد عضوية في بعض المواقع [6] كما أن هذه الترب تتسم بتغير كبير في الخصائص الجيوتقنية حتى ضمن الموقع الواحد، حيث تتناوب طبقات متماسكة وأخرى مفككة، ما يؤدي إلى صعوبة في أخذ عينات ممثلة ودقيقة للدراسات الهندسية [4].

من الناحية الهندسية، الترب السبخة من أكثر الترب تحدياً في مشاريع البناء، إذ تعاني من ضعف في قوة التحمل وخاصة عند التشبع بالمياه، فضلاً عن قابليتها العالية للانهياب أو التآكل بفعل الذوبان أو تغيرات الرطوبة، ما يفرض ضرورة اتباع استراتيجيات خاصة في التصميم وأساسات أو البحث عن طرق فعالة لتحسينها واستقرارها [4][5].

وتتأثر خصائص الترب السبخة بعدة عوامل، منها: نوع الصخور الأم، البنية الطبوغرافية، مستوى المياه الجوفية، الظروف المناخية، ونوعية النشاط البشري في المنطقة [6] [2] وتكمن أهمية دراسة هذا النوع من التربة في تأثيرها المباشر على استدامة المنشآت، و البنية التحتية و كذلك الزراعة في المناطق القاحلة وشبه القاحلة.

I.2 الموقع الجغرافي والبيئي لتربة السبخة

1.1.1 موقع أخذ العينات

تقع منطقة أخذ العينات جنوب مدينة ورقلة، ضمن نطاق سهلي منخفض تغلب عليه التربة السبخة المتأثرة بطبيعة المناخ الجاف والتصريف السيئ، ما يجعلها غير صالحة للبناء (الشكل 1.1) دون معالجات هندسية دقيقة، بسبب ارتفاع نسبة الأملاح والخصائص الفيزيائية الضعيفة للتربة. ورغم طبيعتها الهشة، فإن الموقع يكتسي أهمية استراتيجية بالغة، حيث تحدّه من الشمال الطريق الوطني رقم 49 ومحطة المسافرين، ومن الشرق يمتد نحو الأحياء السكنية ومنشآت حضرية كبرى منها محطة الترامواي. أما من الجنوب والغرب، فيجاور منشآت صناعية وطريقاً حيويًا يربط المنطقة بباقي محاور المدينة.



الشكل 1. 4 منطقة أخذ العينات غرب حي النصر الخفجي ولاية ورقلة

1.2.2 الموقع الجغرافي

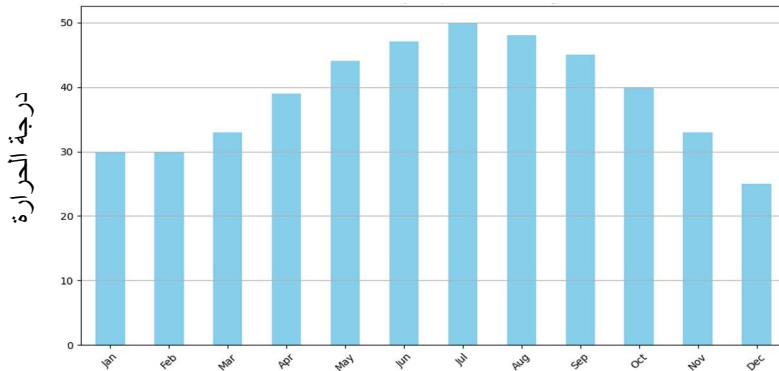
تقع المنطقة المدروسة شمال مدينة ورقلة عند الإحداثيات التقريبية 31.9416° شمالاً و 5.3068° شرقاً، ويبلغ متوسط ارتفاعها ما بين 123 و 219 متراً فوق سطح البحر، حيث تتوزع المنشآت الصناعية والسكنية. المنطقة المحيطة تتسم بطابع صحراوي مفتوح مع انتشار مسالك رملية (الشكل 1.1) ، بينما تبرز في الخلفية مساحات واسعة من الأراضي الرملية الجافة. يعكس هذا الموقع التداخل بين البنية التحتية الحديثة والبيئة الطبيعية الصحراوية، ما يمنحه أهمية جغرافية واقتصادية ضمن ولاية ورقلة في الجنوب الشرقي للجزائر [1].



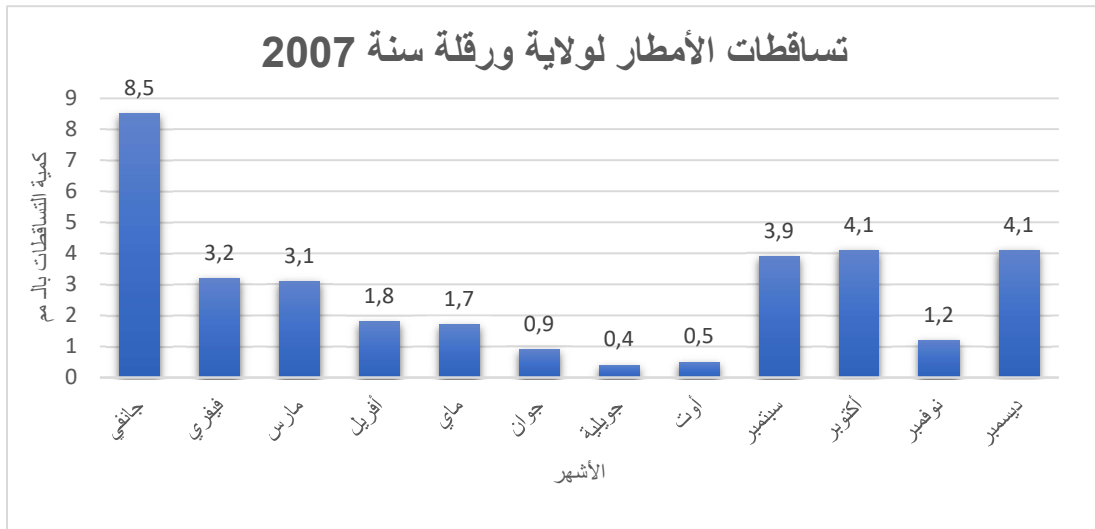
الشكل 1. 5: الخريطة الجغرافية لمنطقة الدراسة

12.3 المناخ

تتميز ولاية ورقلة بمناخ صحراوي حار جاف لصحراء الجزائر، حيث تعرف المنطقة صيفاً طويلاً شديد الحرارة وشتاءً قصيراً معتدلاً إلى بارد [3] [2]. يوضح الشكل 1. 3 تغير درجات الحرارة القصوى في مدينة ورقلة خلال أشهر السنة. نلاحظ أن درجات الحرارة تبدأ بالارتفاع من شهر مارس، وتصل إلى ذروتها في شهري جويليا وأوت حيث تتجاوز 45 درجة مئوية، ثم تبدأ بالانخفاض التدريجي حتى نهاية السنة. يشير ذلك إلى مناخ صحراوي حار صيفاً ومعتدل شتاءً، تشهد الولاية جفافاً شديداً، إذ لا يتجاوز المعدل السنوي للأمطار 45 مم، وتبقى أيام الهطول محدودة جداً خلال السنة، مع سماء غالباً صافية ورطوبة نسبية سنوية في حدود 30% تقريباً. و يعكس هذا المناخ الصحراوي القاسي ظروفًا بيئية تتسم بقلة المياه وتفاوت كبير في درجات الحرارة بين الليل والنهار، ما يؤثر بشكل مباشر على خصائص التربة والغطاء النباتي بالمنطقة [3] [2].



الشكل 1. 6: درجات الحرارة الشهرية القصوى في ورقلة [2]

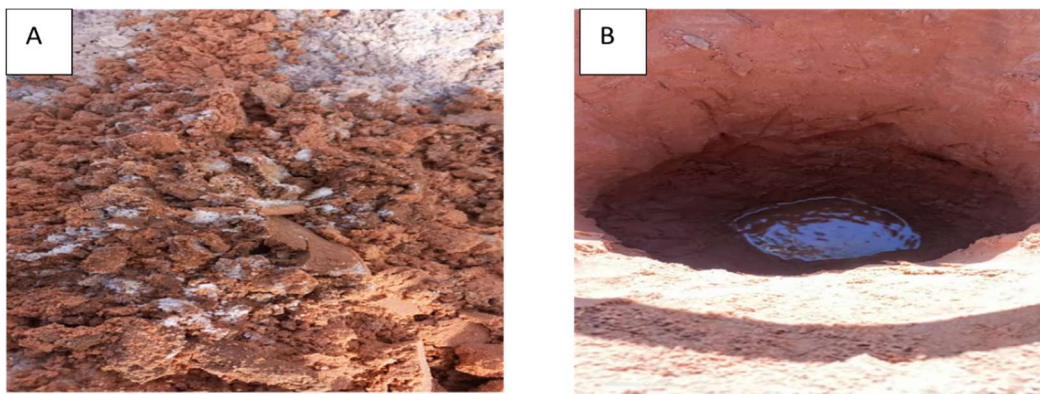


الشكل 7.1: تساقطات الامطار السنوية لولاية ورقلة لسنة 2007

1.3 إشكالية الدراسة:

بنية تربة السبخة في منطقة ورقلة. يظهر في الشكل 5.1 A سطح التربة السبخة بلونها المحمر مع وجود قشور ملحية بيضاء ناتجة عن ارتفاع نسبة الملوحة. أما الشكل 5.1 B فيظهر حفرة ضحلة يتجمع فيها الماء، مما يدل على ارتفاع منسوب المياه الجوفية في هذه المناطق. تربة السبخة في ورقلة غالبًا ما تكون رملية إلى طينية، شديدة الملوحة، ضعيفة التصريف، وتتميز بوجود الأملاح الذائبة مثل الهاليت والجبس، ما يؤثر على خصائصها الميكانيكية واستقرارها، خاصة عند تعرضها للماء أو تغيرات الرطوبة.

هذه الخصائص تجعلها غير مناسبة للبنية التحتية دون تدخلات هندسية. وفي ظل التحديات البيئية والاقتصادية المرتبطة باستخدام المواد التقليدية في تثبيت التربة، برزت الحاجة إلى البحث عن بدائل فعالة ومستدامة.



الشكل 8.1: تربة السبخة غرب حي النصر الخفجي ولاية ورقلة

مسحوق الزجاج المُعاد تدويره والمحاليل الكيميائية الحديثة من الوسائل التي قد تُحسّن خصائص هذه التربة ، حيث تشكل النفايات مشكلة حقيقية مرتبطة بكل حياة بيولوجية وكل نشاط صناعي أو زراعي أو حضري. إن الحاجة العالمية لحماية البيئة وحسن إدارة الموارد تتطلب وضع قوانين جديدة وتبني مفاهيم حديثة. وبناءً على ذلك، لجأ المهندسون إلى معالجة أو تحسين خصائص التربة باستخدام مخلفات الزجاج

وعليه، تتمثل إشكالية هذه الدراسة في السؤال التالي: -ما مدى فعالية استخدام مسحوق الزجاج والمحاليل الكيميائية (سيليكات الصوديوم). في تحسين الخصائص الجيوتقنية لتربة السبخة؟

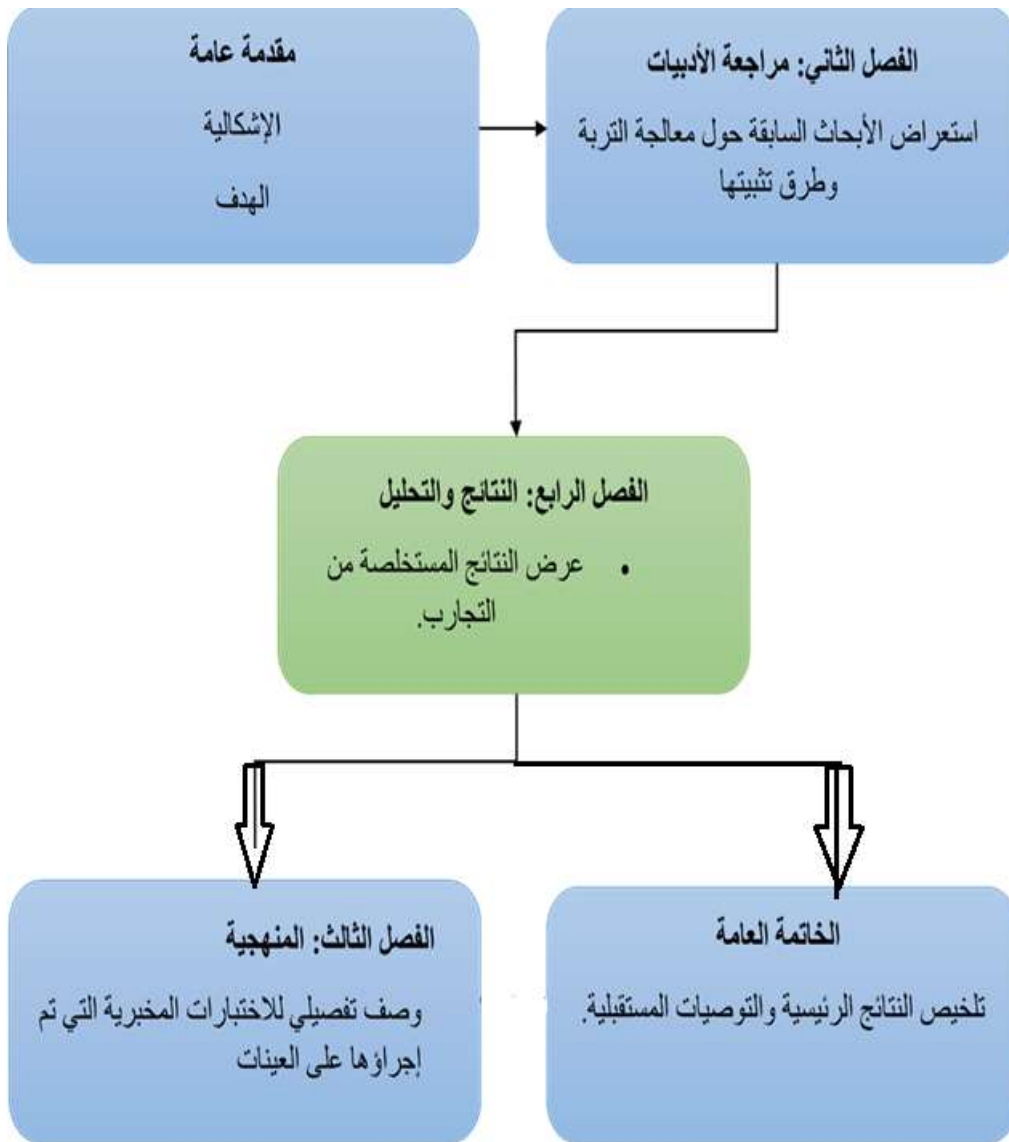
1.4 أهداف الدراسة:

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين الخصائص الجيوتقنية لتربة السبخة باستخدام مواد مُعاد تدويرها، وتحديدًا مسحوق الزجاج والمحاليل الكيميائية (سيليكات الصوديوم). ويمكن تلخيص الأهداف الأساسية فيما يلي:

1. تحديد الخصائص الهندسية الأولية لتربة السبخة قبل المعالجة، من حيث الكثافة، مقاومة القص، قابلية الانضغاط، والنفذية.
2. دراسة تأثير إضافة مسحوق الزجاج بنسب مختلفة على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لتربة السبخة.
3. دراسة تأثير المحاليل الكيميائية في تحسين التفاعل بين مكونات التربة والمواد المضافة، خصوصًا فيما يتعلق بثبات الأملاح والخصائص الكيميائية العامة.
4. مقارنة أداء التربة السبخة المعالجة مع خصائص تربة السبخة غير المعالجة لتقييم مدى التحسن.
5. اقتراح تركيبة فعالة ومثلى من مسحوق الزجاج والمحاليل الكيميائية لتحقيق أعلى كفاءة ممكنة في التثبيت التربة السبخة.

1.5 خطط الدراسة :

لتحقيق الأهداف المرجوة، تقسم المدكرة وفق الهيكل التالي:



الوحدة || :

المراجع الأدبية تربة السبخة

II 1 مقدمة

تربة السبخة من أكثر أنواع الترب تحدياً في اشغال البناء و الطرقات، حيث تتميز بخصائص فيزيائية وكيميائية غير ملائمة للإنشاءات والبنى التحتية [8]. هذه التربة، التي تتواجد بكثرة في مناطق شبه صحراوية مثل منطقة ورقلة، تخلق العديد من المشاكل الهندسية عند استخدامها كأساس للطرق والمنشآت الفنية [9]. إذ تتميز بوجود نسبة عالية من الأملاح القابلة للذوبان، مما يؤدي إلى قلة قدرتها التحملية وارتفاع نسبة الانضغاط والهبوط [10].

من أجل التغلب على هذه الصعوبات، ظهرت العديد من الطرق والتقنيات لتحسين خصائص التربة السبخة، والتي تهدف إلى جعلها صالحة للاستخدام في المشاريع الهندسية [11]. وقد تطورت هذه التقنيات في السنوات الأخيرة، مع التركيز على تحسين قدرة التحمل، تقليل الانضغاط و الهبوط ، وتقوية التربة لضمان استدامة المنشآت [12].

يهدف هذا الفصل إلى مراجعة الأبحاث العلمية والتقارير السابقة المتعلقة بدراسة خصائص التربة السبخة وطرق تحسينها، بالإضافة إلى مناقشة أبرز الدراسات السابقة التي تناولت هذا الموضوع في سياقات مشابهة، مع تسليط الضوء على الأساليب المستخدمة في معالجة هذه التربة في مشاريع البنية التحتية [4]. سيتم التطرق إلى الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة السبخة، عرض التحديات التي تطرحها هذه التربة، والاطلاع على الأساليب الجيوتقنية الحديثة في تحسين خصائصها من خلال الأساليب الميكانيكية والكيميائية [13]. كما سيتم التركيز على أهمية هذه الدراسات في إحداث تغيير إيجابي في جودة الطرق والمنشآت الفنية في المناطق التي تحتوي على تربة سبخة [9].

II 2 تعريف تربة السبخة:

يطلق لفظ (سبخة) على الأراضي المنخفضة من أنواع التربة التي تتميز بوجود نسبة عالية من الأملاح القابلة للذوبان و معرضة لمعدل عالٍ من تبخر المياه، مما يجعلها غير ملائمة في كثير من الأحيان للاستغلال في المشاريع الإنشائية والبنى التحتية [10]. يؤثر وجود الأملاح على خصائص التربة الكيميائية والفيزيائية، مما يقلل من قدرتها على دعم و استقرار الأساسات والبنى التحتية [8].

II 3 أنواع التربة السبخة:

تنقسم تربة سبخة بشكل رئيسي إلى نوعين أساسيين:

II 3.1 السبخة الساحلية:

مسطحات من الرواسب الساحلية تقع عند أو فوق مستوى المد الطبيعي، وتتكون من الرمل والطين أو الطين، وغالباً ما يكون سطحها مغطى بقشرة ملحية بيضاء تشكلت نتيجة تبخر المياه المسحوبة إلى السطح بفعل الخاصية الشعرية أو من السيول البحرية المتكررة. [14] تنتشر السبخات الساحلية على الشواطئ أو بالقرب من البحار



الشكل II 2: السبخات الساحلية بأبوظبي من أكثر الأنواع الموثقة عالمياً [15]

II 3.2 السبخة القارية (الداخلية) :

هي نوع من السبخات التي تتكون داخل اليابسة بعيداً عن السواحل البحرية، وغالباً ما تتواجد في المناطق الصحراوية أو المنخفضات الداخلية. تتسم هذه السبخات بارتفاع ملوحة مياهها الجوفية القريبة من السطح، وتكونها من طبقات متعاقبة من التربة والأملاح ذات سمك مختلفة. غالباً ما تكون مساحة السبخة القارية متوسطة إلى كبيرة حسب خصائص الموقع، ويكون معدل التبخر فيها مرتفعاً بسبب الظروف المناخية الصحراوية، مما يؤدي إلى زيادة ترسيب الأملاح على السطح. كما أن الرواسب الحصوية تكون أكثر تواجداً في السبخة القارية مقارنة بالسبخة الساحلية، ويكون سطحها أقل انحداراً ويتميز بتغير كبير في الخواص الفيزيائية والكيميائية بين مسافات قصيرة. تلعب المياه الجوفية دوراً أساسياً في تكوين هذه السبخات، حيث تصعد إلى أعلى بفعل الخاصية الشعرية وتتبخر عند السطح، مما يرفع من ملوحة التربة ويجعلها غير صالحة للزراعة أو البناء دون معالجات خاصة [16][17][10].

II 4 الخصائص الكيميائية والفيزيائية للتربة السبخة:

- **الملوحة العالية:** تتميز تربة السبخة بوجود نسبة عالية من الأملاح القابلة للذوبان، مثل كلوريد الصوديوم (NaCl) وكبريتات الصوديوم (Na₂SO₄) [10]. تؤدي هذه الأملاح إلى تغيرات في التركيب الحبيبي للتربة، مما يؤثر على خصائص المسامية ويحد من قدرة التربة على الاحتفاظ بالمياه [9]. تربة السبخة غالبًا ما تكون مشبعة بالأملاح التي تتسرب إليها من مياه الأمطار أو الري، مما يؤدي إلى زيادة ملوحة الطبقات السطحية.
- **قابلية الانتفاخ والانكماش:** من الخصائص المميزة للتربة السبخة هي قابلية الانتفاخ نتيجة لتفاعل الأملاح مع الماء. عندما تمتص التربة الرطوبة، ينتفخ حجم التربة بسبب تغير في التركيب الحبيبي، مما يسبب زيادة في الضغط على الأساسات والمنشآت [10]. هذا الانتفاخ قد يؤدي إلى تشققات في الطرق والمنشآت المبنية على التربة السبخة. [8]
- **الهبوط غير المتساوي:** تربة السبخة تظهر قابلية الهبوط غير المتساوي، حيث يحدث توسع وانكماش غير منتظم على سطح التربة. هذا يسبب هبوط الأرض تحت الأحمال بشكل غير متساو، مما يشكل تهديدًا على استقرار الطرق والمنشآت [18].

II 5 المشاكل الجيوتقنية للتربة السبخة:

من أهم المشاكل الجيوتقنية للتربة السبخة :

- **ضعف القدرة التحميلية:** التربة السبخة غالبًا ما تكون ضعيفة القدرة على تحمل الأحمال بسبب ارتفاع نسبة الفراغات وقلة التماسك، خاصة عند وجود نسبة عالية من المياه الجوفية أو عند التشبع [10].
- **قابلية عالية للانضغاط والهبوط:** هذه التربة تتعرض لهبوطات كبيرة وغير منتظمة عند تحميلها، وقد يتراوح مقدار الهبوط بين 20 و100 مم أو أكثر في بعض المواقع، مما يؤدي إلى مشاكل في استقرار المنشآت والبنية التحتية. [10].
- **تغير سريع في الخواص:** تتغير خصائص التربة السبخية بشكل كبير بين نقاط متقاربة، سواء أفقيًا أو رأسيًا، ما يصعب من عمليات التصميم والتنفيذ الهندسي، ويجعل من الضروري إجراء اختبارات ميدانية ومعملية دقيقة في كل موقع [10]..

- **الحساسية الشديدة للماء:** تربة السبخة حساسة جدًا لزيادة محتوى الماء، حيث يؤدي ارتفاع نسبة الرطوبة أو غمرها بالماء إلى فقدان التماسك بشكل كبير وانخفاض مقاومة القص، مما يزيد من مخاطر الهبوط والانهيال [10]..
- **مشكلة الملوحة وتآكل المواد:** ارتفاع ملوحة التربة والمياه الجوفية يسبب تآكلًا للخرسانة والمعادن المستخدمة في الأساسات وشبكات الأنابيب، ويؤثر على عمر المنشآت [10]..
- **عدم التجانس:** التربة السبخية غالبًا ما تكون خليطًا من الرمل غير المتماسك مع نسب متفاوتة من الطين والطيني، ما يؤدي إلى تفاوت في الكثافة النسبية ومقاومة القص من نقطة لأخرى حتى في نفس الموقع [13].

II 6 ظهور مشاكل سطحية في الطرق والمنشآت

من المشاكل الشائعة: تطاير جزء من الأسفلت، ظهور الشقوق والتصدعات، التخذد، وتكون الحفر والهبوطات في الطرق والمنشآت المقامة على السبخات 4.

II 6.1 طرق معالجة تربة السبخة:

هناك عدة طرق فعالة لمعالجة وتحسين خصائص هذه التربة لتصبح صالحة للاستخدام في البناء فيما يلي أبرز الطرق المعتمدة:

- **الإحلال (استبدال التربة):** إزالة تربة السبخة واستبدالها بتربة قوية ومتماسكة مثل الرمل أو الحصى، مع دمكها جيدًا لتوفير قاعدة صلبة للبناء.
- **الحقن بمواد محسنة:** حقن التربة بمواد مثل الإسمنت أو المواد الكيميائية الخاصة التي تساعد على ترابط جزيئات التربة وزيادة قوتها واستقرارها.
- **استخدام الأساسات العميقة (الأوتاد أو الخوازيق):** نقل الأحمال إلى طبقات التربة الأكثر صلابة في الأعماق عندما تكون التربة السطحية ضعيفة جدًا.
- **العزل المائي وحماية التسليح:** زيادة الغطاء الخرساني حول حديد التسليح واستخدام مواد عزل مائي عالية الجودة لحماية الخرسانة والحديد من تأثير الأملاح.
- **التحميل المسبق:** وضع كميات كبيرة من الردم مؤقتًا فوق التربة السبخة لحدوث هبوط واستقرار التربة قبل البناء.

- **الدمك الميكانيكي:** ضغط الطبقات العليا من التربة بمعدات ثقيلة لزيادة كثافتها وتقليل قابليتها للانضغاط.
- **تثبيت التربة السبخية بالأسمت:** معالجة التربة بنسبة 10% من الأسمت المقاوم أو البورتلاندي العادي لتحسين خصائصها واستخدامها كأساس للطرق والمباني.

II 7 مخلفات الزجاج

إعادة تدوير الزجاج يُعد مثالاً بارزاً في حماية البيئة، إذ يمكن إعادة تدويره بنسبة 100% وبدون حدود زمنية أو فقدان لجودته الأصلية. عند صهر طن واحد من الزجاج المجمع، نحصل على طن جديد بنفس الجودة، ما يجعله في دورة إنتاج مستمرة. يهدف تدوير الزجاج إلى حماية البيئة [19] والاستفادة القصوى من النفايات المنزلية، إذ يجتنبنا رمي الزجاج في المكبات أو حرقه. كما أن تدوير الزجاج، سواء كان بنيًا أو أخضر أو شفافاً، يوفر نحو 30% من الطاقة، وتتنخفض تلوث الهواء بنسبة 20%، وتقل المخلفات التعدينية بنسبة 80%. زجاجات المستعملة تُطحن وتُعاد تدويرها إلى منتجات جديدة، لكن عند إرجاعها للبائع، يعاد استخدامها أكثر من 15 مرة قبل تدويرها. بيئياً، يساهم تدوير الزجاج في تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، ويوفر المواد الخام والطاقة المستخدمة في الصناعة [20].

II 7.1 مسحوق الزجاج:

يُعتبر مسحوق الزجاج من المواد البوزولانية الثانوية ذات الفعالية في تحسين الخصائص الهندسية للتربة الضعيفة، وخاصة التربة السبخية التي تعاني من مشاكل ميكانيكية وكيميائية معقدة.

II 7.2 دور مسحوق الزجاج في تحسين التربة الضعيفة:

يعد مسحوق الزجاج من المواد البوزولانية الثانوية الفعالة في معالجة وتحسين خصائص التربة الضعيفة، خاصة التربة السبخية التي تعاني من مشاكل ميكانيكية وكيميائية معقدة. يتم الحصول على هذا المسحوق من خلال طحن نفايات الزجاج إلى حبيبات دقيقة جداً، مما يجعله مادة صديقة للبيئة وذات تكلفة منخفضة. عند إضافته إلى التربة، يتفاعل مسحوق الزجاج مع المكونات الكيميائية، فيقلل من انضغاطية التربة [20] ويزيد من مقاومتها للقص ويحد من التورم، كما يحسن الاستقرار الكيميائي في التربة المالحة. على سبيل

المثال، أظهرت تجارب ميدانية في السعودية أن إضافة 10-15% من مسحوق الزجاج إلى تربة السبخة أدى إلى زيادة قوة الانضغاط وتحسين مقاومة الاختراق بشكل ملحوظ [22]. كما يُستخدم الزجاج المطحون في تعزيز طبقات الطرق وتثبيت تربة الردم، مما يقلل الحاجة للمواد التقليدية ويوفر في التكاليف. بالإضافة إلى ذلك، يساهم استخدام مسحوق الزجاج في تقليل النفايات والانبعاثات الضارة، ويعزز من الاستدامة البيئية في مشاريع البناء والبنية التحتية.

تشير الدراسات الحديثة إلى أن مسحوق الزجاج الناتج عن إعادة تدوير النفايات الزجاجية يُعد مادة فعالة وصديقة للبيئة لتحسين خصائص الترب الضعيفة، خاصة التربة الطينية الانتفاخية والتربة السبخية التي تعاني من مشاكل ميكانيكية مثل الهبوط والتورم وضعف مقاومة القص. يحقق مسحوق الزجاج هذه النتائج بفضل خصائصه البوزولانية، حيث يتفاعل مع مكونات التربة ليكوّن مركبات إسمنتية تزيد من قوة التربة وتقلل من انضغاطيتها وتورمها [23].

في دراسة أجريت على تربة طينية انتفاخية في أوغندا، تم خلط التربة بنسب مختلفة من مسحوق الزجاج (3%، 5%، 7%، 9%) من الوزن الجاف للتربة. أظهرت النتائج أن إضافة مسحوق الزجاج حسنت بشكل ملحوظ قوة التربة، حيث ارتفعت مقاومة الضغط غير المحصور من 18.8 كيلو باسكال في العينة الأصلية إلى 35.8 كيلو باسكال عند إضافة 7% من المسحوق، كما انخفضت قابلية التورم بشكل واضح مع زيادة نسبة الزجاج المضاف. وأوصت الدراسة بأن النسبة المثلى لتحسين التربة هي 7% من الوزن الجاف [9]. [11]. [24]. أما في دراسة أخرى، فقد بينت النتائج أن إضافة مسحوق الزجاج بنسبة 8% من وزن التربة أعطت أفضل تحسن في مقاومة القص والكثافة الجافة القصوى، مع انخفاض في حدود السيولة واللدونة، ما ينعكس إيجاباً على استقرار التربة تحت الأساسات والطرق [25].

بالإضافة إلى ذلك، أظهرت تجارب في باكستان أن زيادة نسبة مسحوق الزجاج حتى 20% أدت إلى انخفاض كبير في التورم وتحسن في الخصائص الهندسية مثل كثافة التربة ونسبة تحمل كاليفورنيا (CBR) [26]، مع تحقيق أفضل النتائج عند النسبة المثلى (بين 8% و12% حسب نوع التربة). كما أن استخدام مسحوق الزجاج في تثبيت التربة يُعد خياراً اقتصادياً وبيئياً، إذ يساهم في تقليل النفايات الزجاجية، ويوفر بديلاً منخفض التكلفة للمواد الكيميائية التقليدية المستخدمة في تحسين التربة [27].

خلاصة القول، يؤكد البحث العلمي أن مسحوق الزجاج المعاد تدويره يُعد مادة فعالة ومستدامة لتحسين الترب الضعيفة، حيث يعزز من قوتها ويقلل من مشاكلها الهندسية، ويوفر حلاً بيئياً واقتصادياً في مشاريع البنية التحتية والإنشاءات [28].

II 8 سيليكات الصوديوم:

II 8.1 تعريف

سيليكات الصوديوم، المعروفة أيضًا باسم "الزجاج المائي" أو "الماء الزجاجي"، هي مركب كيميائي غير عضوي ذو الصيغة Na_2SiO_3 ، يظهر غالبًا على شكل مادة صلبة بيضاء أو مسحوق أو محلول مائي شفاف [29]. يتم الحصول عليها صناعيًا من تفاعل السيليكا (الرمل) مع كربونات الصوديوم عند درجات حرارة مرتفعة [30].

تُعد سيليكات الصوديوم من المواد المتميزة في تثبيت التربة مقارنة بمواد التثبيت التقليدية مثل الأسمنت والجير، وذلك للأسباب التالية:

II 8.2 الخصائص:

- سيليكات الصوديوم مادة قلووية، قابلة للذوبان في الماء، وتكوّن محاليل لزجة عديمة اللون أو بيضاء.
- تتحمل درجات حرارة عالية) حتى 1100 °C وتتميز بقدرتها على تكوين طبقة صلبة زجاجية عند الجفاف [29].
- يمكن تعديل خصائصها بتغيير نسبة السيليكا إلى الصوديوم حسب التطبيق المطلوب 5.

II 8.3 دور سيليكات الصوديوم في تثبيت التربة السبخية :

سيليكات الصوديوم (Na_2SiO_3) يُستخدم كمتبث كيميائي لتحسين الخصائص الهندسية للتربة السبخة والضعيفة، عبر آليات تفاعلية تعزز التماسك وتقلل الانضغاطية والتورم. تعتمد فعاليته على تفاعله مع مكونات التربة وتكوين مركبات أسمنتية تعمل على ربط الحبيبات.

آليات التثبيت الرئيسية:

1. التفاعل البوزولاني: يتفاعل سيليكات الصوديوم مع أكاسيد الكالسيوم في التربة أو المواد المضافة

(مثل خبث الأفران) لتكوين هيدرات سيليكات الكالسيوم (C-S-H) ، والتي تعزز القوة والتماسك. 17

2. **تقليل الأملاح الذائبة:** في تربة السبخة المالحة، يخفض إضافة سيليكات الصوديوم مع خبث الصلب

نسبة الأملاح الذائبة بنسبة تصل إلى 93%، مما يحسّن الاستقرار الكيميائي [30]

3. **تحسين الكثافة والقوة:** يؤدي استخدام سيليكات الصوديوم مع خبث الصلب (40%) إلى زيادة قوة

الضغط غير المحصور للتربة السبخية من 70~ kPa إلى 41.22 MPa، أي بنسبة تحسن تصل

إلى 17.950%

أظهرت الدراسات الميدانية نتائج ملموسة لاستخدام سيليكات الصوديوم في تحسين الترب الضعيفة. في تربة

السبخة بأبوظبي، حقق خلط التربة مع 40% خبث صلب و 40% سيليكات صوديوم أعلى قوة انضغاط

بلغت 41.22 ميجا باسكال، مع تحسّن بنسبة 950% مقارنة بالتربة غير المعالجة، أما في التربة الانتفاخية

بالجزائر، فقد خفضت إضافة 0.8 مول/لتر من سيليكات الصوديوم جهد الانهيار بنسبة 87%، عبر تكوين

شبكة سيليكات تعزز التماسك بين حبيبات التربة. 5 وفي التربة العضوية بإيران، أدت إضافة 15% من السيليكات

إلى رفع مقاومة القص من 4.1 إلى 12 كغم/سم² بعد 28 يوماً من المعالجة [31].

تظهر الدراسات أن سيليكات الصوديوم ليس فقط يحسّن الخصائص الميكانيكية للتربة، بل يوفر حلاً مستداماً

للتحديات البيئية والهندسية في المناطق ذات الترب الضعيفة.

II 9 ملخص اعمال السابقة على التربة:

يعرض فيما يلي خلاصة لأبرز هذه الدراسات، موضحة المواد المستخدمة، نسبها، وأثرها في تحسين التربة.

الجدول II. 1 : جدول يلخص للدراسات حول استخدام مسحوق الزجاج أو سيليكات الصوديوم في تحسين

التربة السبخة والضعيفة [25,25,34,33].

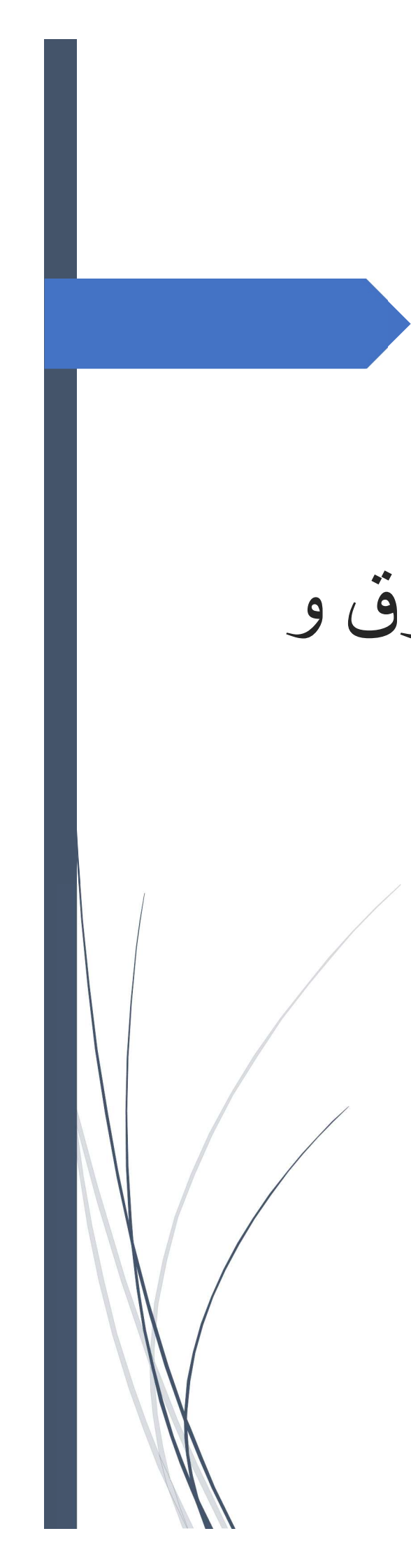
الدراسة	المواد المستخدمة	نوع التربة	نسبة/حجم الإضافة	الفعالية والنتائج الرئيسية
تحسين التربة الطينية بمسحوق الزجاج	مسحوق الزجاج	تربة طينية	12%	<ul style="list-style-type: none"> 5 انخفاض التورم بمقدار أضعاف. زيادة نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR). زيادة قوة الانضغاط -
تثبيت تربة السبخة بسيليكات الصوديوم والخبث	خبث صلب + سيليكات صوديوم	تربة سبخية	30-40% لكل مادة	<ul style="list-style-type: none"> (TDS) تقليل الأملاح الذائبة - 93.3% بنسبة زيادة قوة الانضغاط - ميجا باسكال 41.22 إلى بعد التجميد - 2.65% فقد كتلة - الذوبان
تأثير مسحوق الزجاج على خصائص التربة الطينية	مسحوق الزجاج (75 ميكرون)	تربة طينية	12%	<ul style="list-style-type: none"> أضعاف 5 تقليل التورم - تقليل الانضغاطية بأكثر من 50% - زيادة CBR -
تأثير مسحوق الزجاج على مقاومة القص للتربة الرملية	مسحوق الزجاج (أحجام منخل مختلفة)	تربة رملية سيئة التدرج	5-10%	<ul style="list-style-type: none"> زيادة زاوية الاحتكاك - 29% الداخلي 130% زيادة التماسك - 2.6% زيادة قدرة التحمل -
تأثير مسحوق الزجاج على الخواص الجيوتقنية	مسحوق الزجاج	تربة ضعيفة متنوعة	4% ، 8% ، 12%	<ul style="list-style-type: none"> انخفاض حدود السيولة واللدونة - زيادة مقاومة القص - 8%: النسبة المثلى -

II 10 ملاحظات:

- مسحوق الزجاج: أظهر فعالية في تحسين التربة الطينية عبر تقليل الانضغاطية وزيادة الكثافة الجافة.
- سيليكات الصوديوم مع الخبث: حقق نتائج استثنائية في تربة السبخة عبر تفاعلات كيميائية تعزز التماسك وتقلل الأملاح.
- النسب المثلى: تتراوح بين 10-15% لمسحوق الزجاج في التربة، و 30-40% لسيليكات الصوديوم مع الخبث في التربة السبخية.

II 11 الخاتمة:

في هذا الفصل، قمنا بعرض أهم الدراسات والأبحاث التي تناولت تربة السبخة وخصائصها، مع التركيز على الصعوبات المرتبطة بها وطرق تحسينها. كما تعرفنا على المواد المختلفة التي يمكن استخدامها لتحسين خصائص التربة، مثل مسحوق الزجاج والسيليكات. هذه المراجعة تساعدنا على فهم تربة السبخة بشكل أفضل، وتوفر أساساً جيداً للجزء العملي من هذه الدراسة، الذي سيركز على تحسين خصائص تربة السبخة في منطقة ورقلة.



الوحدة III : الطـرق و المنهجية

III.1 المقدمة

في هذا الوحدة تم عرض المنهجية المعتمدة لفهم ظاهرة تثبيت و تحسين التربة السبخة باستخدام مواد معالجة مختلفة. تم اختيار مخلفات الزجاج و سيليكات الصوديوم كمضافات تُضاف إلى التربة بنسب حجمية محددة بهدف تحسين خصائصها الجيوتقنية. شملت الدراسة تنفيذ مجموعة من الاختبارات المخبرية، مثل التحليل الحبيبي وتحديد محتوى الماء، وذلك للتعرف على خصائص التربة الأساسية قبل المعالجة. كما تم إجراء اختبارات ميكانيكية كاختبار بروكتور المعدل والقص المباشر UU - CD واختبار نسبة تحمل كاليفورنيا لتقييم مدى تحسن مقاومة التربة بعد إضافة المواد المختارة. تم الالتزام في جميع مراحل العمل بالإجراءات القياسية المعتمدة، مع توثيق كل خطوة وفقاً للمعايير المعمول بها لضمان دقة النتائج وموثوقيتها.

III.2 المواد المستعملة

III.2.1. تربة السبخة

في هذه الدراسة، تم اختيار التربة السبخة من منطقة ورقلة

III.2.2. مسحوق الزجاج:

مسحوق الزجاج المستخدم في التجارب المخبرية هو عبارة عن نفايات زجاجية تم طحنها وغربلتها باستخدام منخل بحجم 0.08 ملم.

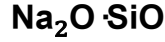
III.2.2.1 الخصائص الفيزيائية لمسحوق الزجاج

الخاصية	القيمة/الوصف
حجم الحبيبات	ميكرومتر ≤ 80
الكثافة الظاهرية	كغ/م ³ 850
الكثافة النوعية	(2.5-2.6 جم/سم ³)

III.2.2.2 الخصائص الكيميائية لمسحوق الزجاج

III.2.2.3 سيليكات الصوديوم

سيليكات الصوديوم هي مركب كيميائي يُعرف أيضاً باسم "الزجاج المائي" وصيغته الكيميائية هي :



III.2.2.2 المواصفات الشكل والخصائص سيليكات الصوديوم

الجدول: 1. المواصفات الشكل والخصائص سيليكات الصوديوم

القيمة	خصائص المنتج
14.12	نسبة أكسيد الصوديوم
28.23	نسبة ثاني أكسيد السيليكون
2.00	النسبة الوزنية %SiO ₂ /Na ₂ O
1.50	الكثافة النوعية عند 20 درجة مئوية
42.35	المواد الصلبة الذائبة الكلية
400	اللزوجة عند 20 درجة مئوية
قلوية	درجة الحموضة

سيليكات الصوديوم مركب متعدد الاستخدامات، مهم في العديد من الصناعات، ويتميز بخصائصه القلوية وذوبانه في الماء وسهولة تحضيره واستخدامه.

III.3.2 اختبار التحليل الحبيبي

تعد تجربة التحليل الحبيبي من التجارب المخبرية الأساسية في ميكانيكا التربة، إذ تهدف إلى تحديد توزيع أقطار الحبيبات ضمن العينة المدروسة. وتستخدم نتائج هذا التحليل في تصنيف التربة بناءً على نسب مكوناتها الحبيبية (كالرمل والطين)، مما يساهم في تقييم خصائصها الفيزيائية والهندسية وتقدير سلوكها تحت تأثير الأحمال المختلفة.

III.3.3 اختبار بروكتور المعدل

يعد اختبار بروكتور من التجارب المخبرية الأساسية في ميكانيك التربة، ويهدف إلى تحديد الكثافة الجافة العظمى للتربة ودرجة الرطوبة المثلى اللازمة لتحقيقها، وذلك من خلال رصّ التربة داخل قالب أسطواني باستخدام طاقة محددة ناتجة عن سقوط مطرقة ذات وزن ومعايير محددة. تُجرى هذه التجربة وفق بروتوكول دقيق يضمن تكرار النتائج ومقارنتها. وتوجد نسختان معتمدتان من هذا الاختبار: اختبار بروكتور النظامي واختبار بروكتور المعدل، ويختلفان في طاقة الرص المستخدمة. وقد تأسس هذا الاختبار بناءً على أبحاث وملاحظات المهندس الأمريكي رالف بروكتور سنة 1933، الذي لاحظ العلاقة بين محتوى الرطوبة وكثافة

التربة المضغوطة.



الشكل 3. III. قالب بروكتور

تحديد الكثافة الجافة العظمى والرطوبة المثلى للتربة تحت تأثير طاقة دمك مرتفعة، بهدف تقييم مدى قابلية التربة للدمك وتحقيق أفضل نسبة كثافة ممكنة أثناء تنفيذ أعمال الردم أو الأساسات، خاصة في المشاريع التي تتطلب قدرة تحمل عالية.

III.3.4 اختبار نسبة تحمل كاليفورنيا

اختبار نسبة تحمل كاليفورنيا هو تجربة مخبرية تهدف إلى قياس قدرة التربة على مقاومة الاختراق، وذلك من خلال تحديد الضغط اللازم لغرز مكبس أسطواني (ذو قطر وسرعة تحميل محددتين) داخل عينة تربة. ويتم

مقارنة القوة المطلوبة لاختراق العينة المدروسة مع القوة المطلوبة لاختراق تربة معيارية، بهدف تحديد قوة تحمل التربة الطبيعية أو المواد المستخدمة في طبقات الرصف. تُضغَط عينة التربة السبخة المدروسة في قالب CBR قطره 15.2 سم، ارتفاعه 15.2 سم (بعد أن يتم ضبطها على محتوى مائي متجانس ومحدد جيدًا). بعد ذلك، يتم ثقبها ويُستنتج من الضغط اللازم لهذا الثقب (إجراءات الثقب موحدة) مؤشر يحدد جودة المادة من الناحية الطرقية في ظروف الكثافة ومحتوى الماء الخاصة بالاختبار. يُستخدم هذا الاختبار بشكل أساسي لتقييم قوة تحمل الطبقات القاعدية في مشاريع إنشاء الطرق والمطارات، خاصة في تصميم الأرصفة المرنة. كما يُشترط أخذ عينة على الأقل من كل مصدر للمواد القاعدية لفحصها باستخدام هذا الاختبار.



الشكل III 4 جهاز دليل التحمل الكاليفورني

معادلات الحساب:

1. القيمة الأولى (I_1) عند اختراق 2.5 ملم:

$$I_1 = \frac{\text{قوة الاختراق عند 2.5}}{13.35} \times 100 \quad (Kn)$$

2. القيمة الثانية (I_2) عند اختراق 5 ملم:

$$I_2 = \frac{\text{قوة الاختراق عند 5}}{19.93} \times 100 \quad (Kn)$$

تحديد المؤشر النهائي:

$$\text{CBR} = I.CBR = \max (I.CBR 2,5(mm) ; I.CBR 5(mm))$$

تجربة القص المباشر

اختبار القص المباشر يقيس قوة القص للتربة، وهي أقصى إجهاد قص يمكن للتربة تحمله قبل أن تنهار أو تنزلق.

✚ قياس زاوية الاحتكاك الداخلي وتماسك التربة:

يُستخدم أيضًا لتحديد زاوية الاحتكاك الداخلي (زاوية الميل) وتماسك التربة، وهما خصائص مهمة في التصميم الهندسي.

تساعد نتائج اختبار القص المباشر في تصميم الأساسات والجدران الاستنادية والجسور.



الشكل III.1 : تحضير عينات للتجربة القص



الشكل III.2 : جهاز القص المباشر

الجدول 2. III. مقارنة لأنواع اختبار القص المباشر [8]

نوع الاختبار	توحيد العينة	التصريف أثناء القص	المعاملات المقاسة	الاستخدام النموذجي
UU غير موحد وغير مصرف	لا	لا	مقاومة القص الكلية	الإنشآت السريعة، الاستقرار قصير الأمد، الطين المشبع
CU موحد وغير مصرف	نعم	لا	مقاومة القص الكلية والفعالة (إذا تم قياس ضغط المسام)	التحميل المؤقت، السدود الترابية
CD موحد ومصرف	نعم	نعم	مقاومة القص الفعالة	الاستقرار طويل الأمد، المنشآت الدائمة، الرمال والحصى

III.3.6 تجارب الخصائص الكيميائية

III.3.6.1 حيود الأشعة السينية (DRX) للتربة المستخدمة

تم اكتشاف الأشعة السينية بواسطة فيلهلم كونراد رونتجن عام 1895. غالبًا ما تُستخدم هذه الطريقة التحليلية لمعرفة درجة تبلور مادة ما، وإظهار اتجاه النمو البلوري المفضل للحبيبات المكونة للمادة. إنها طريقة مميزة لتحليل الطبقات الرقيقة. فهي سهلة التطبيق وغير إتلافية، وتُستخدم في الدراسات البلورية للمواد الصلبة ذات البنية المنظمة (البلورات)، حيث تتسبب في حدوث ظاهرة متقطعة (على عكس الغازات والسوائل والمواد الصلبة غير المتبلورة التي ينتج عنها ظاهرة تشتت مستمر للأشعة السينية)، إذ لا يُعاد إرسال شعاع الأشعة السينية الساقط إلا في اتجاهات محددة فقط.

يعتمد مبدأ التحليل على حيود الأشعة السينية أحادية اللون بواسطة المستويات الذرية لبلورات المادة المدروسة انظر الشكل (III-11) يحدث الحيود فقط في المواد المتبلورة. تفاعل الأشعة السينية مع المادة يؤدي إلى تشتت مترابط .

III.4 الخاتمة

مهما كانت الأهداف المرجوة من الدراسة الجيوتقنية، يبقى تحديد هوية التربة خطوة أساسية لا غنى عنها في بداية أي مشروع. فهذه العملية تُمكن المهندس من تصنيف المواد الموجودة بدقة، وتوجيه التحاليل والاختبارات الجيوتقنية اللاحقة بشكل صحيح. يعتمد هذا التصنيف على دراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية للتربة، مثل التركيب الحبيبي، ونسبة الرطوبة، وقوة التحمل. إن فهم هذه الخصائص بشكل جيد يساهم في اتخاذ قرارات تصميمية سليمة، ويقلل من المخاطر الفنية والاقتصادية المرتبطة بالمشاريع الهندسية، مما يجعل دراسة هوية التربة الأساس الذي تُبنى عليه جميع المراحل التالية في العمل الجيوتقني.

وهكذا، فإن تحليل السلوك الميكانيكي للتربة السبخة يعتمد على اختبارات مخبرية أو ميدانية. هذا المجال يسمح بتحديد مقاومة التربة وقدرتها على التحمل، وبالتالي، يمكن من خلاله التنبؤ بشكل كمي بالتشوه أو الهبوط. وقد خُصص هذا الفصل لتحديد هوية التربة السبخة، ويحتوي الوحدة على جميع الاختبارات التي أُجريت في مختبر الجامعة و مخبر الأشغال العمومية للجنوب بورقلة.

الوحدة : V النتائج و المناقشات

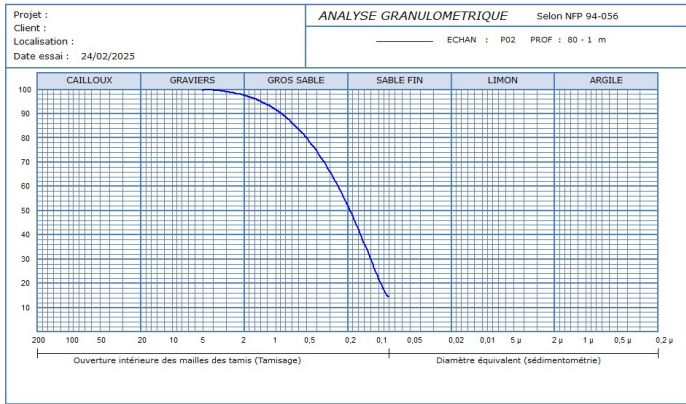
IV.1 المقدمة

تخصص هذه الوحدة لعرض جميع نتائج الاختبارات التي أُجريت على عينة التربة السبخة المأخوذة من منطقة ورقلة ، والتي تمت معالجتها بنسب مختلفة من المواد الكيميائية، ونفايات الزجاج مسحوق تم ترتيب الاختبارات كما يلي: اختبارات التعريف (محتوى الرطوبة، التحليل الحبيبي، التحليل بالأشعة السينية، تجارب كيميائية) والاختبارات الميكانيكية بروكتور المعدل، واختبار نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR) والقص المباشر وقد تم عرض هذه النتائج في شكل جداول ومنحنيات.

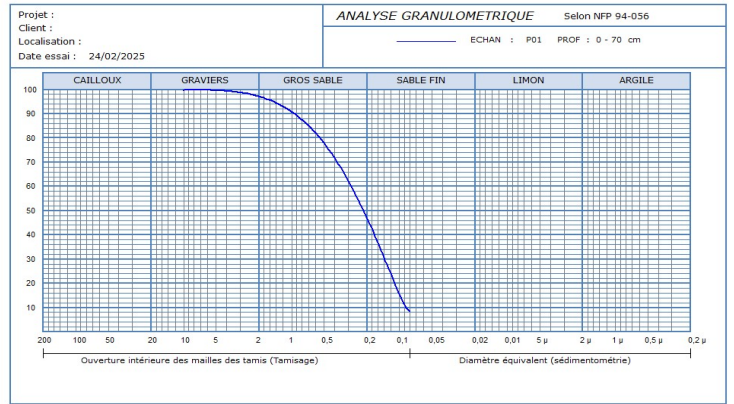
IV.2 نتائج تحليل التربة السبخة قبل المعالجة

IV.2.1 نتائج التدرج الحبيبي

في هذا الجزء، سيتم عرض نتائج تجربة التدرج الحبيبي التي أُجريت على عينة التربة السبخة المدروسة، مع توضيح توزيع الأحجام المختلفة للحبيبات ومناقشة دلالاتها في تقييم خصائص التربة الشكل IV.1



Programme: Solbels 2007 ©



Programme: Solbels 2007 ©

الشكل IV.1: منحنيات التدرج الحبيبي الخاصة بالعينات

العينة (العمق) (cm)	D10	D30	D60	Cu	Cc	نوع التربة
P01 (70-90)	0.07	0.13	0.27	3.86	0.89	رمل سيء التدرج
P01 (0-70)	0.06	0.11	0.23	3.83	0.88	رمل سيء التدرج
P02 (80-100)	0.08	0.15	0.31	3.88	0.91	رمل سيء التدرج
P02 (0-80)	0.07	0.13	0.27	3.86	0.89	رمل سيء التدرج
P03 (80-95)	0.09	0.18	0.36	4.00	1.00	رمل سيء التدرج
P03 (0-80)	0.08	0.16	0.32	4.00	1.00	رمل سيء التدرج

تظهر نتائج التدرج الحبيبي الجدول 1. 1. IV. للعينات المأخوذة من أعماق مختلفة في المواقع المدروسة (P01، P02، P03) أن جميع المنحنيات تتميز بانحدار حاد وتركز معظم الحبيبات في نطاق الرمل الخشن إلى الرمل الناعم، مع غياب شبه تام للمواد الدقيقة مثل الغرين والطين، مما يدل على أن التربة ذات توزيع حبيبي ضيق وتجانس واضح بين مختلف الأعماق والمواقع؛ ووفقاً لمعاملات التصنيف (Cu) و (Cc) المستخرجة من هذه المنحنيات، فإن جميع العينات تصنف كرمل سيء التدرج (SP) حسب نظام التصنيف الموحد للتربة (USCS)، وهو ما ينعكس في سلوك هندسي متوقع من حيث النفاذية الجيدة وقابلية الرص المحدودة، ويوضح أن هذه التربة لا تحتوي على تدرج حبيبي واسع أو مواد دقيقة تؤثر على خصائصها الميكانيكية.

توضح نتائج اختبار المحتوى المائي (%) w للعينات المدروسة وجود تباين ملحوظ الجدول 2. 1. IV. في نسبة الرطوبة بين الطبقات السطحية والعميقة، حيث تراوحت القيم بين 17.60% و 33.78%، مع تسجيل أعلى نسبة رطوبة في العينة P3 (80-95 سم) والتي قد تعكس وجود طبقات طينية أو تأثير المياه الجوفية في هذا العمق، بينما أظهرت العينات الأخرى نسب رطوبة معتدلة تتناسب مع طبيعة التربة الرملية في المنطقة؛ وتشير هذه النتائج إلى أهمية أخذ الرطوبة العالية في الاعتبار عند دراسة الخصائص الهندسية للتربة، خاصة في الأعماق التي تتجاوز فيها الرطوبة 20%، إذ قد تؤثر سلباً على قدرة تحمل التربة واستقرارها الإنشائي، مما يستدعي إجراء اختبارات إضافية لتحديد سلوك التربة تحت الأحمال المختلفة.

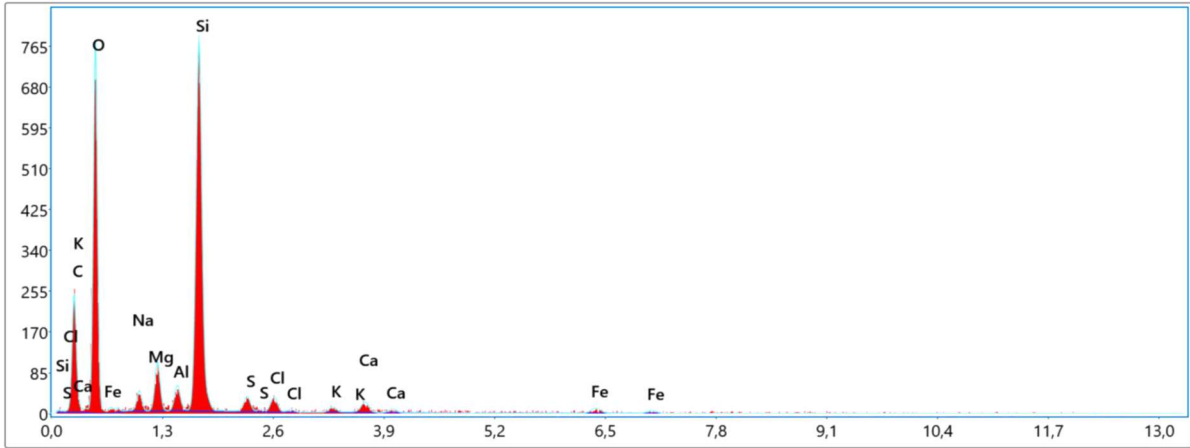
IV.2.3 النتائج الكيميائية

IV.2.3.1 التحليل الطيفي بالأشعة السينية DRX

تحليل DRX (مطيافية تشتت الطاقة بالأشعة السينية) هو تقنية تحليلية تُستخدم لتحديد العناصر الكيميائية الموجودة فيالتربة وتقدير نسبها بدقة عالية.

IV.2.3.1 تحليل التركيب المعدني للتربة باستخدام تقنية حيود الأشعة السينية DRX

DRX اختصار لـ X هي تقنية تحليلية تُستخدم في المختبرات لدراسة التركيب البلوري للمواد، وخاصة المعادن في التربة.



الشكل IV. 2: نتائج EDX

يكشف التحليل الكمي للعناصر في عينة التربة، كما هو موضح في الجدول 1، عن تركيب تسيطر عليه نسبة عالية من الأكسجين (44.27% من الكتلة، 45.47% من الذرات) والكربون (28.42% من الكتلة، 38.88% من الذرات)، مما يشير إلى محتوى مرتفع جداً من المادة العضوية. يوجد السيليكون بنسبة 16.82% من الكتلة، مما يعكس وجود مكون معدني مهم، على الأرجح من معادن السيليكات. كما أن مستويات العناصر الغذائية الأساسية مثل المغنيسيوم (2.68%)، والصوديوم (1.73%)، والكالسيوم (1.12%)، والبوتاسيوم (0.48%) منخفضة نسبياً. أما العناصر النزرة مثل الألمنيوم (1.26%)، والكبريت (0.95%)، والكلور (1.07%)، والحديد (1.20%) فهي موجودة بكميات ضئيلة. وتدعم المعايير التقنية (Kratio, Z, A, F) موثوقية هذه القياسات. بشكل عام، التربة غنية بالمادة العضوية وتحتوي على كمية معتدلة من المعادن، لكنها تقتصر إلى العناصر الأساسية اللازمة للاستقرار الإنشائي، مما يجعلها غير مناسبة للبناء دون معالجة أو تدعيم كبير.

الجدول IV. 1: التحليل الكيميائي لتربة السبخة

P ₃ 80 cm-1 m	P ₃ 0-80 cm	P ₂ 80cm- 1 m	P ₂ 0-80 cm	P ₁ 80- 1cm	P ₁ 0-80 cm	العنصر/المركب
6.2	2.13	2.5	1.17	0.82	1.032	نسبة كبريتات الكالسيوم
0.534	0.439	0.361	0.292	0.594	0.293	كلوريد الصوديوم
9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	كربونات الكالسيوم
0.32	0.2677	0.22	0.1781	0.3624	0.179	نسبة الكلوريد
9.4	9.8	10	10	10	9.8	نسبة هيدروكسيد الصوديوم
7.66	7.75	7.57	7.62	7.58	7.59	درجة الحموضة

الكبريتات CaSO₄ >

نسبة الكبريتات CaSO₄ يتم استخراج الكبريتات باستخدام حمض الهيدروكلوريك المخفف من أخذ عينة من التربة ، وفقاً للمعيار (NF 1744-1(P 18-660-1))

الكلوريدات (NaCl)

الجدول IV. 2 : تصنيف التربة حسب محتوى الكلوريد (Cl⁻) [38]

محتوى الكلوريد في التربة (%)	تصنيف التربة حسب محتوى الكلوريد (Cl ⁻)
أقل من 0.1	منخفض
0.1 – 0.5	متوسط
أكثر من 0.5	مرتفع

يتم التعبير عن الكلوريدات وإدراجها كنسبة أيون الكلوريد (Cl⁻) كنسبة مئوية وزنية من مادة الحبيبات. النتائج التي تم الحصول عليها تظهر أن مادتنا تحتوي على نسبة مرتفعة من الكلوريدات وتتطلب معالجة.

كربونات الكالسيوم: (CaCO₃)

يمثل هذا المحتوى مؤشراً جيداً للمقاومة الميكانيكية والحساسية للماء. وفقاً لقيمتها، يتطور السلوك من خصائص الطين إلى خصائص الصخور (كورداري، 1995).

نسبة الكربونات في التربة السبخة المدروسة هي 9.2%، مما يعني أنه يتمتع بخصائص الطين (Clay).

➤ الأس الهيدروجيني

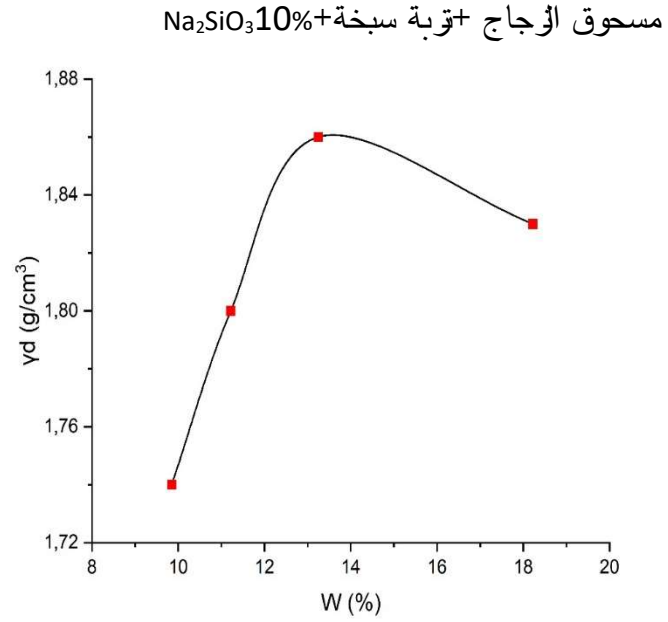
(pH = 7.75) في التربة تشير إلى أنها قلوية قليلاً، مما يؤثر على خصائصها الهندسية

ان ارتفاع محتوى كربونات الكالسيوم (تربة كلسية) يوفر بعض المزايا مثل مقاومة الحموضة وإمكانية تكوين بنية فيزيائية جيدة، إلا أن التحليل يُظهر عدة مشكلات حرجة: التربة تحتوي على نسب عالية من الكبريتات ومركبات الصوديوم، مما قد يسبب عدم استقرار كيميائي وانتفاخ التربة خاصة عند تعرضها

للماء. كما أن زيادة الصوديوم (من هيدروكسيد الصوديوم وكلوريد الصوديوم) قد يؤدي إلى ظروف تربة صودية، مما ينتج عنه ضعف في البنية وقلة قدرة التحمل وميل التربة للتفكك [36]. بالإضافة إلى ذلك، فإن ارتفاع درجة الحموضة (القلوية) ووجود الأملاح يمكن أن يضعف التربة أكثر ويجعلها غير مناسبة لتحمل الأحمال الثقيلة أو مقاومة ضغط المرور. وعلى الرغم من أن التربة الكلسية يمكن أحياناً معالجتها هندسياً للاستخدام في البناء، إلا أن ذلك يتطلب عادةً إجراءات تدعيم كبيرة مثل إضافة مواد، وتحسين الصرف، أو حتى استبدال الطبقات السطحية من التربة. وبدون مثل هذه المعالجات، لن توفر هذه التربة أساساً مستقراً أو دائماً للمباني أو الطرق [36].

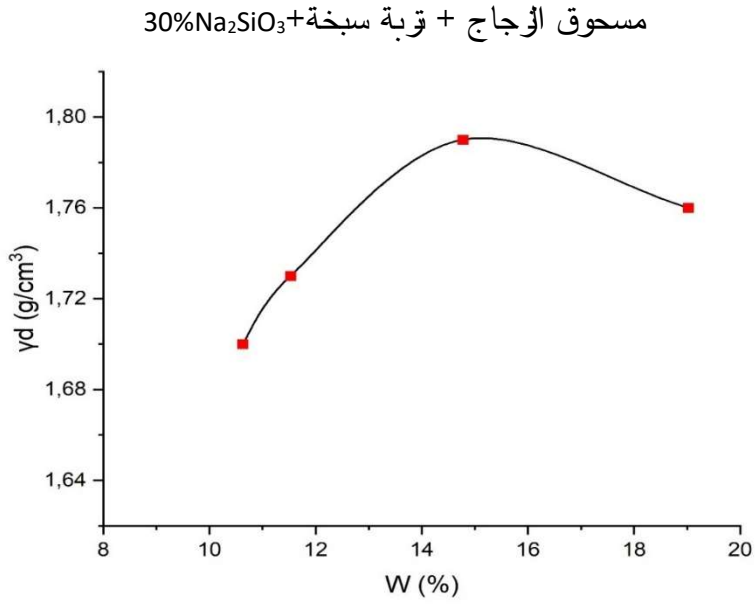
IV.3 نتائج تحليل التربة السبخة بعد المعالجة**IV.3.1 نتائج البروكتور**

نتائج تجربة بركتور المنجزة على التربة السبخة مع الإضافات (مسحوق الزجاج و سيليكات الصوديوم)



الشكل 3. IV. تغير الكثافة الجافة مسحوق الزجاج +تربة سبخة+10%Na₂SiO₃ بدلالة محتوى الماء

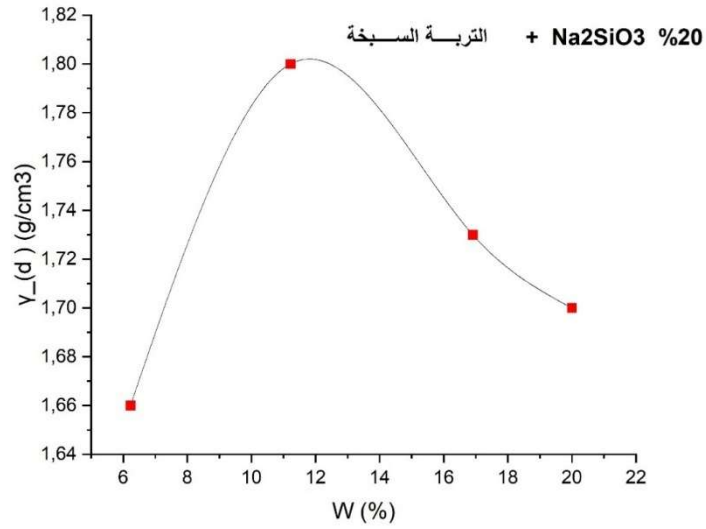
❖ مسحوق الزجاج + تربة سبخة + 30%Na₂SiO₃



الشكل IV. 4 تغير الكثافة الجافة للتربة سبخة + 30%Na₂SiO₃ بدلالة محتوى الماء

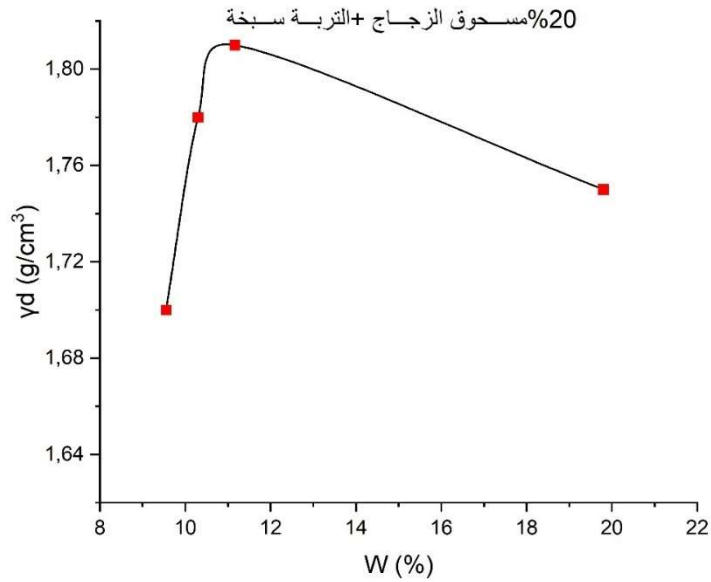
ترية السبخة+ Na_2SiO_3 %+20% مسحوق الزجاج

❖ الترية السبخة+ Na_2SiO_3 %+20% مسحوق الزجاج



الشكل IV.5 : تغيير الكثافة الجافة للتربة السبخة+ Na_2SiO_3 %+20% مسحوق الزجاج بدلالة محتوى الماء

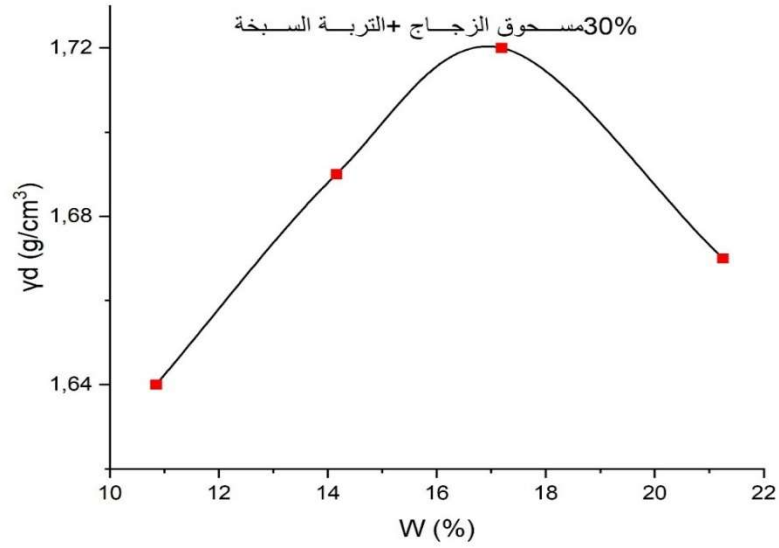
❖ تأثير مسحوق الزجاج



❖ التربة السبخة + 20% مسحوق الزجاج

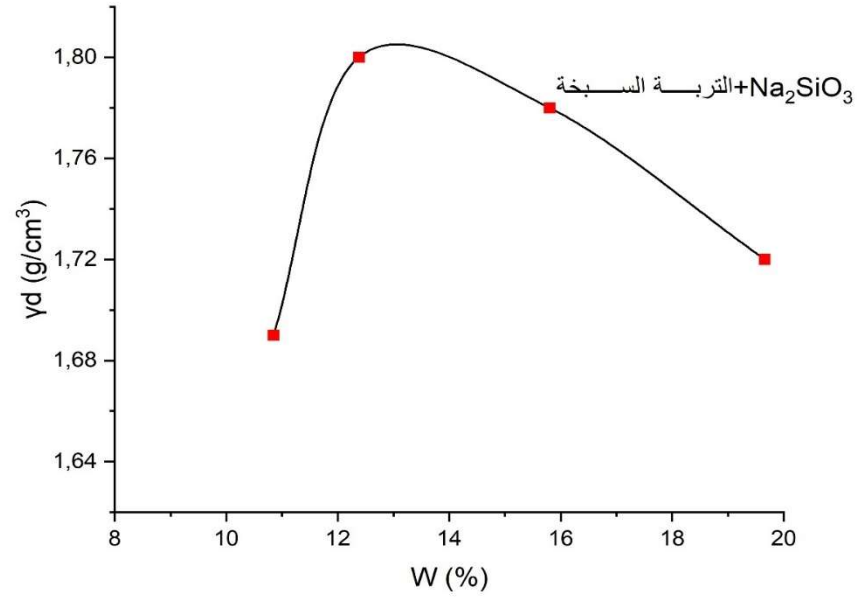
الشكل 6. IV. نتيجة اختبار بروكتور التربة
السبخة + 20% مسحوق الزجاج

❖ التربة السبخة+30% مسحوق الزجاج



الشكل IV.7: تغير الكثافة الجافة التربة السبخة+30% مسحوق الزجاج بدلالة

محتوى الماء



الشكل IV. 8 تغير الكثافة الجافة التربة السبخة + Na_2SiO_3 بدلالة
محتوى الماء

الجدول 3. IV : ملخص نتائج تجربة البروكتور القياسى

التجربة	الوصف	ترميز	محتوى الرطوبة (%)	الكثافة الظاهرية للتربة (غ/سم ³)
1	التربة السبخة	SS	12.5	1.772
2	التربة السبخة+10% مسحوق الزجاج	SS+10% GP	14.02	1.7
3	التربة السبخة+20% مسحوق الزجاج	SS+20%GP	11.16	1.81
4	التربة السبخة +30% مسحوق الزجاج	SS+30%GP	17.17	1.72
5	التربة السبخة+10%Na ₂ SiO ₃	SS+10% Na ₂ SiO ₃	10.85	1.69
6	التربة السبخة+20%Na ₂ SiO ₃	SS+20% Na ₂ SiO ₃	12.38	1.8
7	التربة السبخة+30%Na ₂ SiO ₃	SS+30% Na ₂ SiO ₃	15.8	1.78
8	التربة السبخة 10%مسحوق الزجاج20% +Na ₂ SiO ₃	SS+20% Na ₂ SiO ₃ +10% GP	13.25	1.86
9	التربة السبخة 20%مسحوق الزجاج20% +Na ₂ SiO ₃	SS+20% Na ₂ SiO ₃ +20% GP	11.22	1.9
10	التربة السبخة 30%مسحوق الزجاج20% +Na ₂ SiO ₃	SS+20% Na ₂ SiO ₃ +30% GP	14.78	1.79

تحليل نتائج التجربة: تأثير إضافة مسحوق الزجاج و Na_2SiO_3 على خصائص التربة السبخة

1-تأثير إضافة مسحوق الزجاج

- عند إضافة 10% مسحوق زجاج، ارتفع محتوى الرطوبة إلى 14.02% وانخفضت الكثافة الظاهرية قليلاً (1.7).
- عند زيادة النسبة إلى 20%، انخفض محتوى الرطوبة (11.16%) وارتفعت الكثافة (1.81).
- عند 30%، ارتفع محتوى الرطوبة بشكل ملحوظ (17.17%) بينما الكثافة لم تتغير كثيراً (1.72).
- الاستنتاج: إضافة مسحوق الزجاج تؤثر بشكل غير خطي على الرطوبة والكثافة، ويبدو أن النسبة المثلى لزيادة الكثافة هي 20%

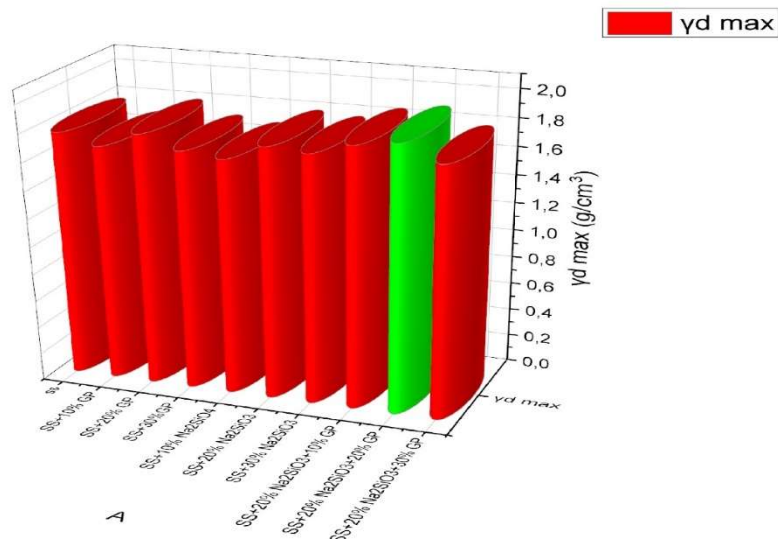
2-تأثير إضافة Na_2SiO_3

- عند 10%، انخفض محتوى الرطوبة (10.85%) وانخفضت الكثافة (1.69).
- عند 20%، ارتفع محتوى الرطوبة (12.38%) وزادت الكثافة (1.8).
- عند 30%، زاد محتوى الرطوبة (15.8%) والكثافة (1.78).
- الاستنتاج: التأثير مشابه لمسحوق الزجاج، مع أفضل كثافة عند 20%.

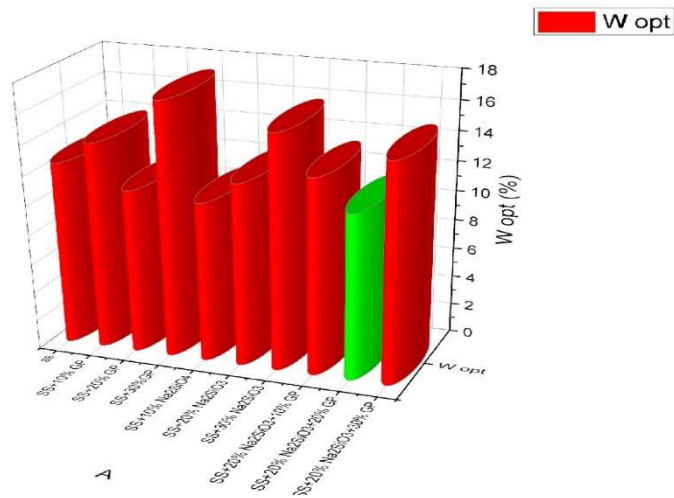
3-تأثير الإضافة المشتركة مسحوق زجاج + $(\text{Na}_2\text{SiO}_3)$

- عند إضافة 10% زجاج + Na_2SiO_3 20%، ارتفعت الكثافة إلى 1.86.
- عند 20% زجاج + Na_2SiO_3 20%، وصلت الكثافة إلى أعلى قيمة (1.9) مع أقل محتوى رطوبة (11.22%).
- عند 30% زجاج + Na_2SiO_3 20%، الكثافة 1.79 والرطوبة (14.78%).
- الاستنتاج: الإضافة المشتركة بنسب 20% زجاج + Na_2SiO_3 20% أعطت أفضل تحسن في الكثافة وانخفاض الرطوبة.

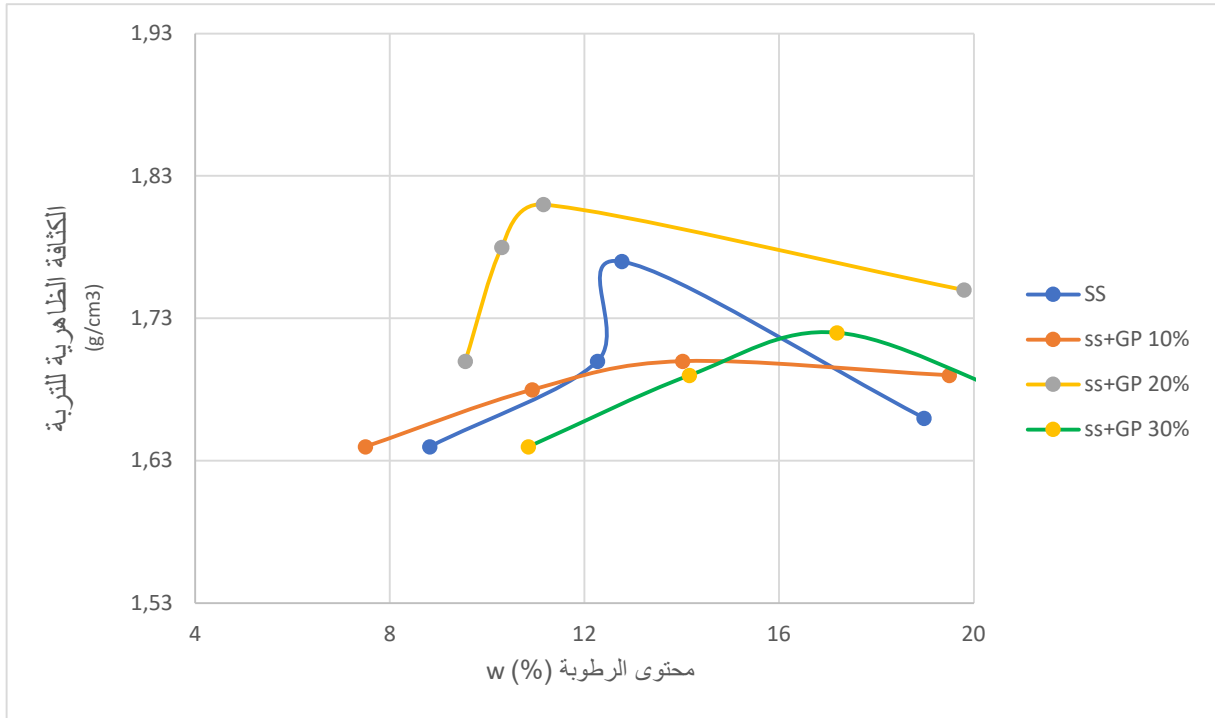
- خليط التربة السبخة مع 20% مسحوق الزجاج + Na_2SiO_3 20% أعطى أعلى كثافة ظاهرية (1.9) غ/سم³ وأقل محتوى رطوبة (11.22%)، مما يدل على تحسن ملحوظ في خواص التربة.
- كل من مسحوق الزجاج و Na_2SiO_3 يُحسنان من الكثافة الظاهرية للتربة ويقللان محتوى الرطوبة عند نسب معينة، لكن التأثير الأمثل يتحقق عند الجمع بينهما.
- إضافة مسحوق الزجاج و Na_2SiO_3 ، خاصة عند نسب 20% لكل منهما، يؤدي إلى تحسين كبير في خصائص التربة السبخة من حيث الكثافة الظاهرية ومحتوى الرطوبة. الشكلين IV.11 IV.12



الشكل IV.9. أفضل كثافة جافة في تجربة البروكتور القياسي



الشكل IV.10. أقل محتوى مائي في تجربة البروكتور القياسي

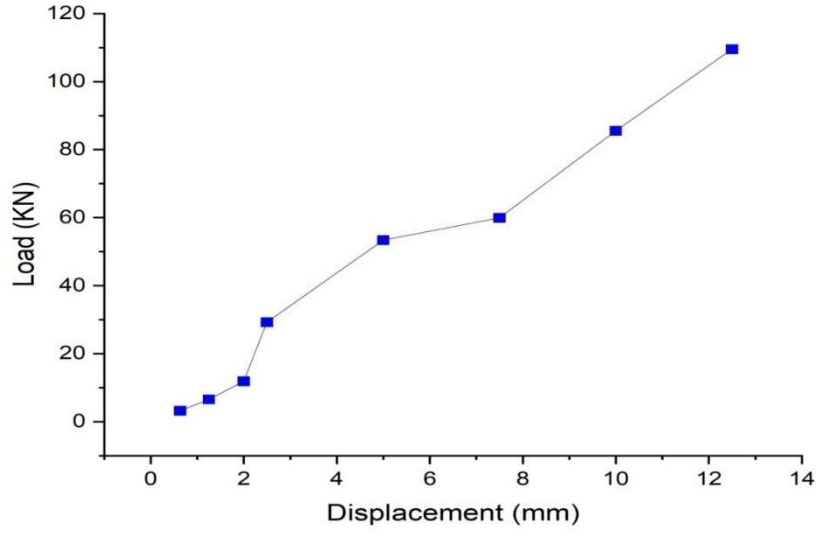


الشكل IV. 11 تغير الكثافة الجافة للتربة بدلالة محتوى الرطوبة مع إضافة مسحوق الزجاج

أظهرت عدة دراسات [5,6] أن إضافة 20% من مسحوق الزجاج النفايات فعالة في تثبيت تربة السبخة والتراب الطينية الانتفاخية. فقد بينت أبحاث أجرتها جامعة شيراز (2024) [6] أن زيادة محتوى مسحوق الزجاج حتى 20% يؤدي إلى انخفاض ملحوظ في محتوى الرطوبة الأمثل (OMC) وزيادة في الكثافة الجافة القصوى (MDD)، مما يحسن خصائص الدمك ومقاومة التربة دون الحاجة إلى تفعيل قلوي. وبالمثل، أظهرت دراسة أجريت على الترب الانتفاخية في باكستان [5] أن إضافة 20% من مسحوق الزجاج حققت أكبر انخفاض في قابلية التمدد وحسنت الخصائص الهندسية مثل قدرة التحمل. تشير هذه النتائج إلى أن دمج 20% من مسحوق الزجاج يُعد خياراً واعداً ومستداماً لتحسين الأداء الجيوتقنية للترب المالحة والانتفاخية مثل تربة السبخة.

أظهرت نتائج استخدام 20% من سيليكات الصوديوم في تربة السبخة تحسناً واضحاً في الكثافة الجافة القصوى وانخفاضاً في محتوى الرطوبة الأمثل مقارنة بالتربة غير المعالجة أو المعالجة بنسب أقل. ويعود ذلك إلى تفاعل سيليكات الصوديوم مع الأملاح والمعادن الطينية في التربة، حيث تتكون هلامات جيوبوليمرية تملأ الفراغات بين الحبيبات وتزيد من تماسكها، مما يؤدي إلى رفع الكثافة الجافة وتحسين استقرار التربة تحت التحميل. كما تساهم هذه الهلامات في تقليل امتصاص الماء، فتقل الحاجة إلى الرطوبة أثناء الدمك. وقد دعمت دراسات مثل دراسة Alhosani وآخرون (2024) [41] ودراسة Bensalem وآخرون

نائج مشابهة
من الأملاح
لأ ومستداماً



23)

من

مثل

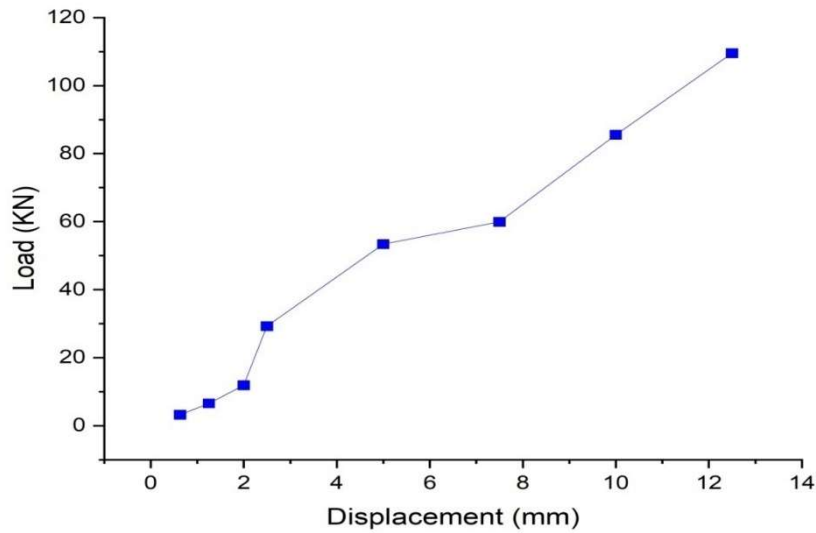
لتحس

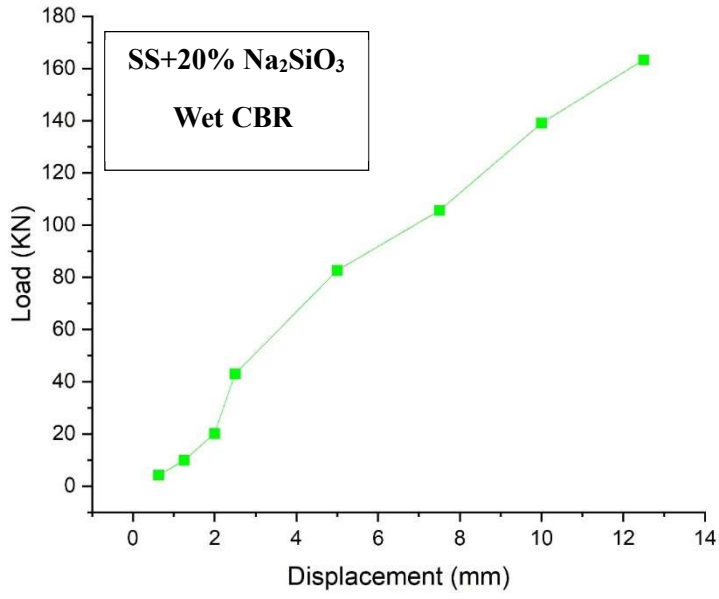
3.2

تعد تجربة معامل كاليفورنيا (CBR) من التجارب المهمة لتحديد قدرة تحمل التربة تحت ظروف معينة من الضغط والرطوبة. في هذا الجزء، سيتم تحليل نتائج تجربة CBR المنجزة في مخبر LTPS ورقلة على عينات التربة السبخة المعالجة التي أظهرت تحسن في الدمك.

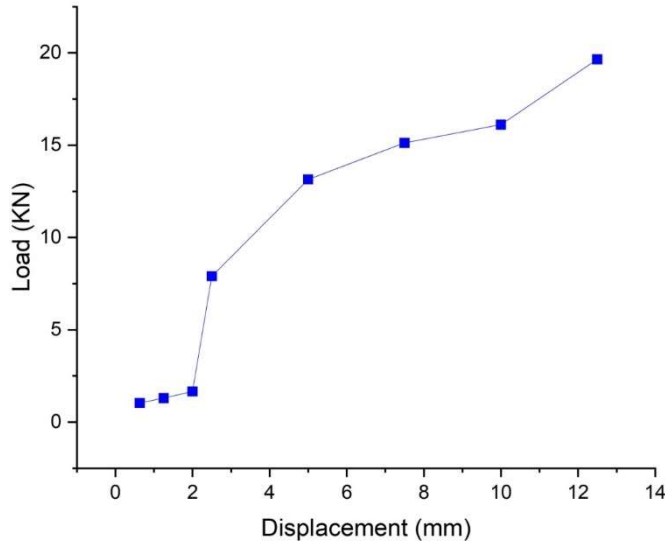
SS+20% Na₂SiO₃

Soaked CBR

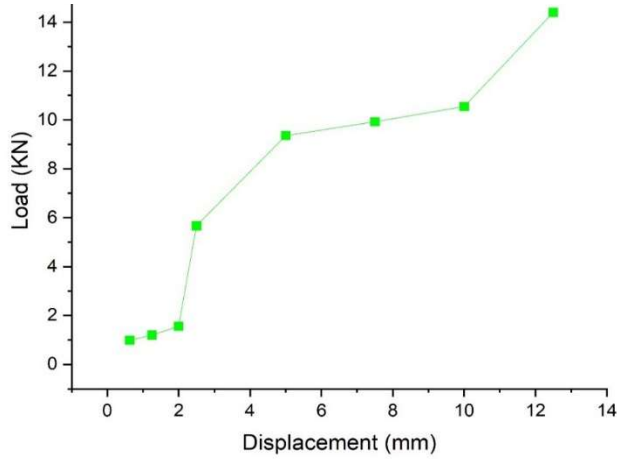




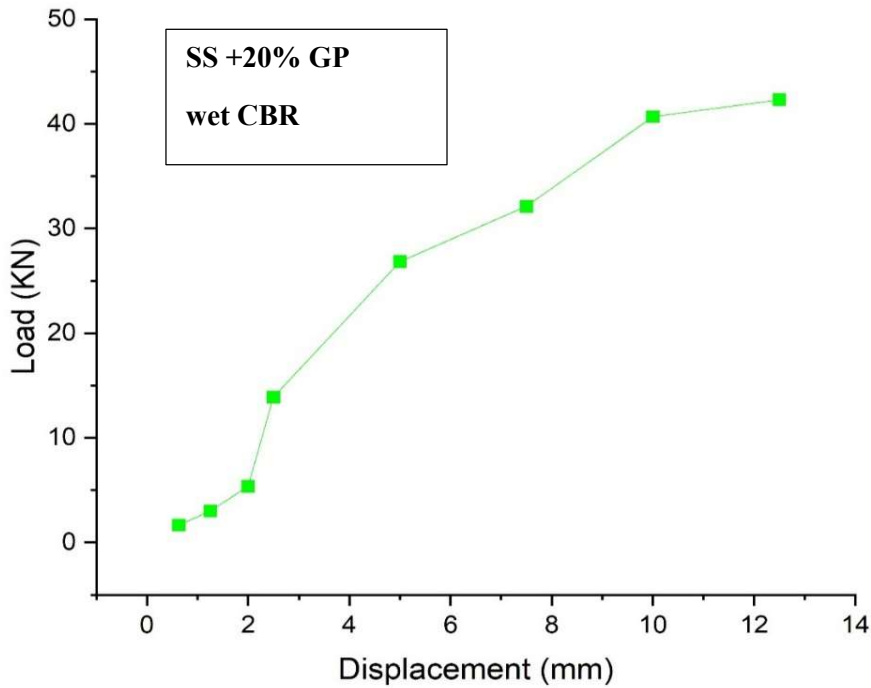
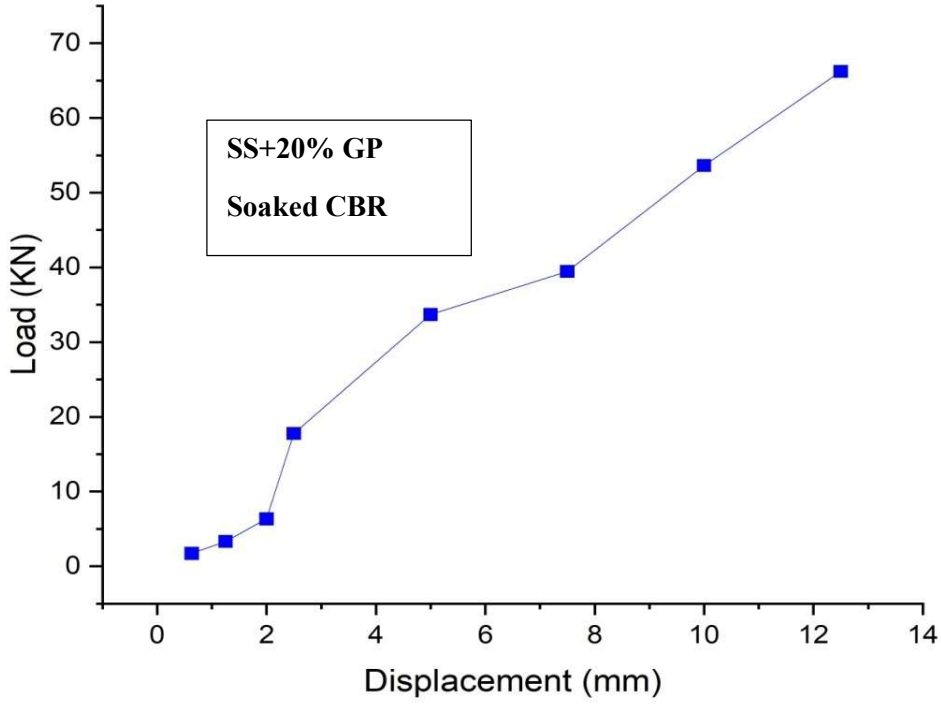
الشكل IV. 12. منحنى تجربة CBR لتربة السبخة SS



SS
Soaked CBR

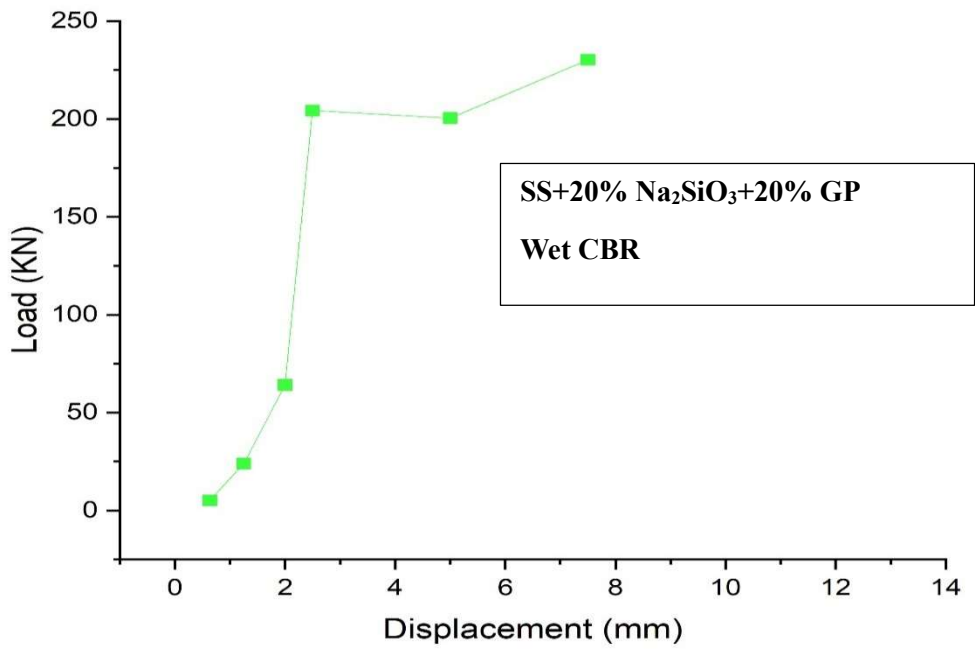
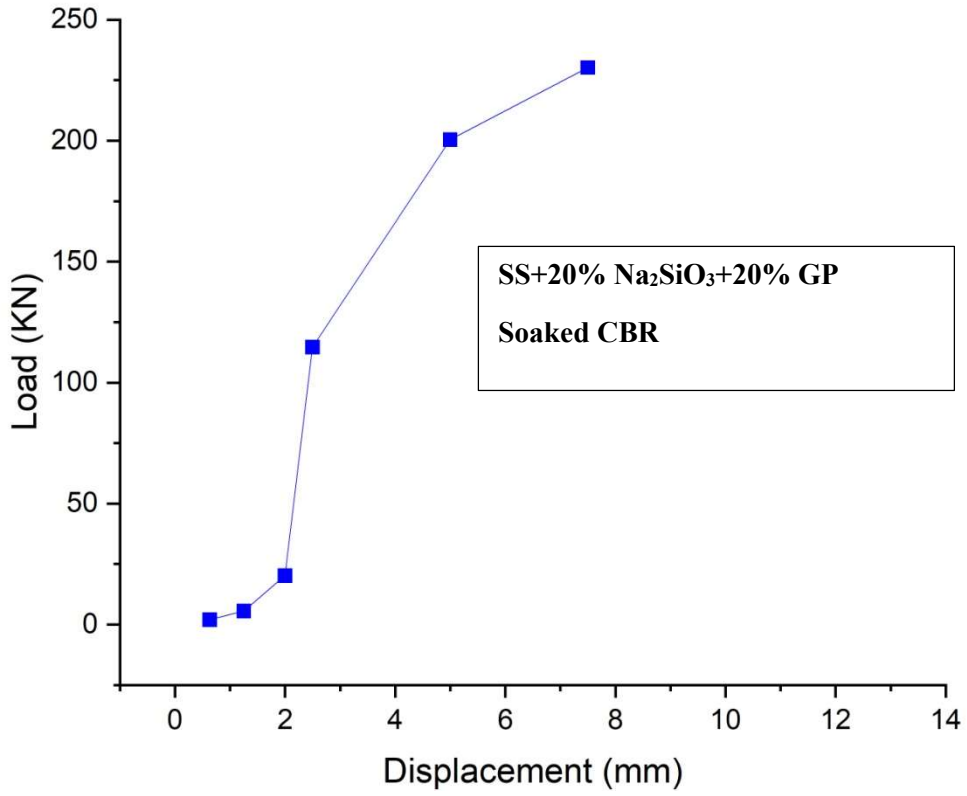


SS
Wet CBR



الشكل

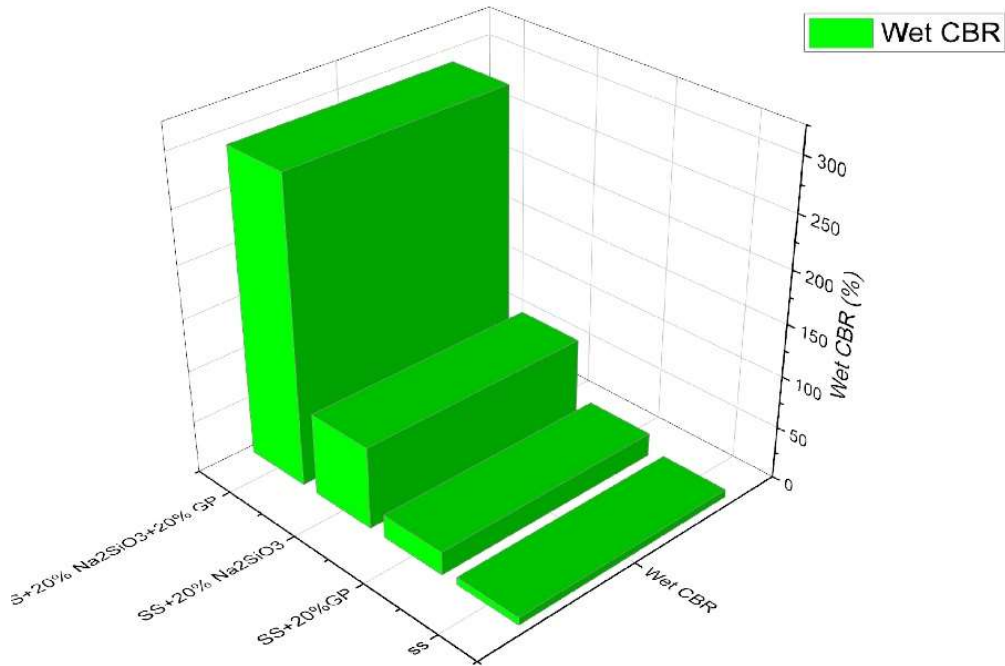
الشكل IV. 13 منحنى تجربة CBR لتربة السبخة SS



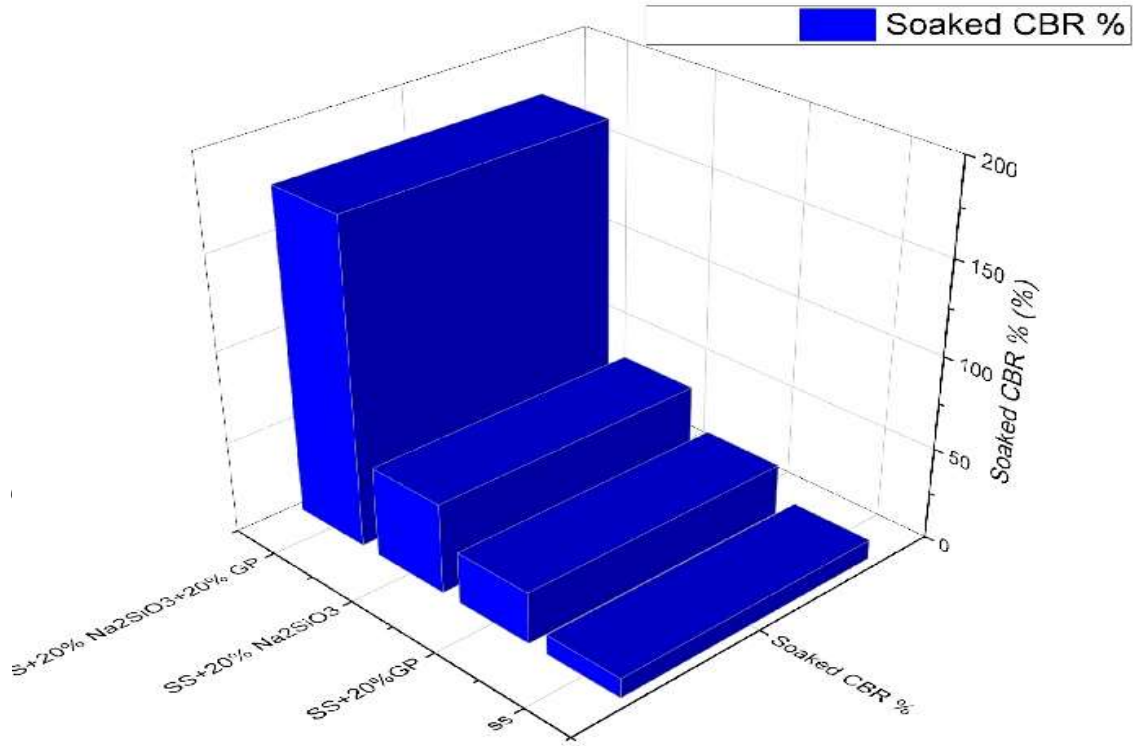
الشكل IV. 14 منحنى تجربة CBR SS+20% Na₂SiO₃+20% GP

الجدول IV.4: ملخص نتائج تجربة CBR

الوصف	wet CBR %	Soaked CBR %
التربة السبخة	7,38	10.66
التربة السبخة+20% مسحوق الزجاج	22.29	27.99
السبخة+20%Na ₂ SiO ₃	78.93	49.03
التربة السبخة 20%مسحوق الزجاج+20% Na ₂ SiO ₃	291,87	175,28



الشكل IV.15 يوضح تأثير إضافة سيليكات الصوديوم ومسحوق الزجاج على نسبة التحمل الكاليفورني الرطبة (Wet CBR) للتربة



الشكل IV. 16 يوضح تأثير إضافة سيليكات الصوديوم ومسحوق الزجاج على نسبة الكاليفورني (Soaked CBR) للتربة

تحليل نتائج تجربة معامل كاليفورنيا (CBR)

- سجلت التربة غير المعالجة قيمًا منخفضة جدًا لمعامل كاليفورنيا، حيث بلغ CBR المشبع **10.66%** والرطب **7.38%**، ما يعكس ضعف قدرة التحمل وعدم صلاحية التربة مباشرةً للاستخدام في مشاريع الطرق دون معالجة.
- أظهرت زيادة ملحوظة في قيم CBR، حيث بلغت **27.99%** في الحالة المشبعة و**22.29%** في الحالة الرطبة.
- يدل هذا التحسن على تأثير مسحوق الزجاج في تحسين التماسك وتقليل الفراغات.
- سجلت قيمًا أعلى من السابقة، حيث بلغ CBR المشبع **49.03%** والرطب **78.93%**.
- يعكس هذا التحسن تأثير سيليكات الصوديوم في تقوية الروابط بين الحبيبات وزيادة التماسك العام.

○ حققت أعلى القيم بشكل واضح، حيث بلغ CBR المشبع **175.28%** والرطب **291.87%**.

○ يشير هذا التحسن الكبير إلى وجود تأثير تآزري بين المادتين في تحسين قدرة التحمل بشكل كبير.

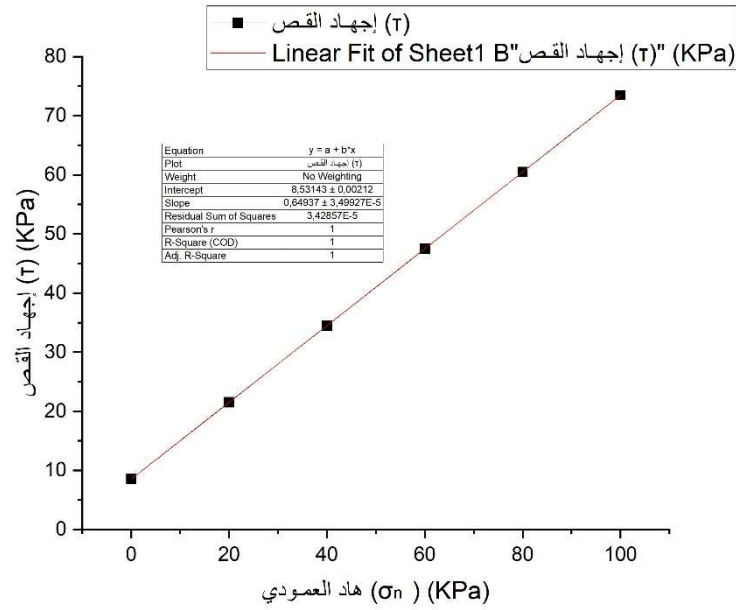
تعتبر التربة المعالجة بمزيج **20%** مسحوق الزجاج + **20%** سيليكات الصوديوم هي الأفضل من حيث قيم CBR ، حيث أظهرت تحسناً كبيراً مقارنة بباقي العينات الشكل **IV.19**. هذا يشير إلى أن دمج المادتين يؤدي إلى تحسين خصائص التربة السبخة بشكل فعال للغاية.

إن دمج **20%** من مسحوق الزجاج مع **20%** من سيليكات الصوديوم (Na_2SiO_3) يؤدي إلى تحسين كبير في قيمة نسبة التحمل الكاليفورني (CBR) للتربة، وذلك بفضل التفاعلات البوزولانية والجيوبوليميرية المتكاملة بين المادتين. يعمل مسحوق الزجاج، الغني بثاني أكسيد السيليكون (SiO_2) ، على التفاعل مع البيئة القلوية التي توفرها سيليكات الصوديوم لتشكيل هلامات إسمنتية مثل (N-A-S-H) تساهم في ربط الحبيبات وتقليل الفراغات وزيادة قدرة التربة على التحمل. أظهرت الدراسات أن إضافة مسحوق الزجاج وحده بنسبة **15%** ترفع CBR بنحو **200%** في الترب الانتفاخية [43]، بينما تساهم سيليكات الصوديوم في تقليل حساسية التربة للرطوبة والانتفاخ من خلال تثبيت الأملاح في الترب المالحة مثل السبخة [44]. وعند الجمع بين هذين المكونين، تتحسن بنية التربة وقيم CBR بشكل ملحوظ هذا النهج ينسجم مع متطلبات الاستدامة، حيث يعيد تدوير المخلفات الصناعية ويحقق أداءً هندسياً عالياً للتربة.

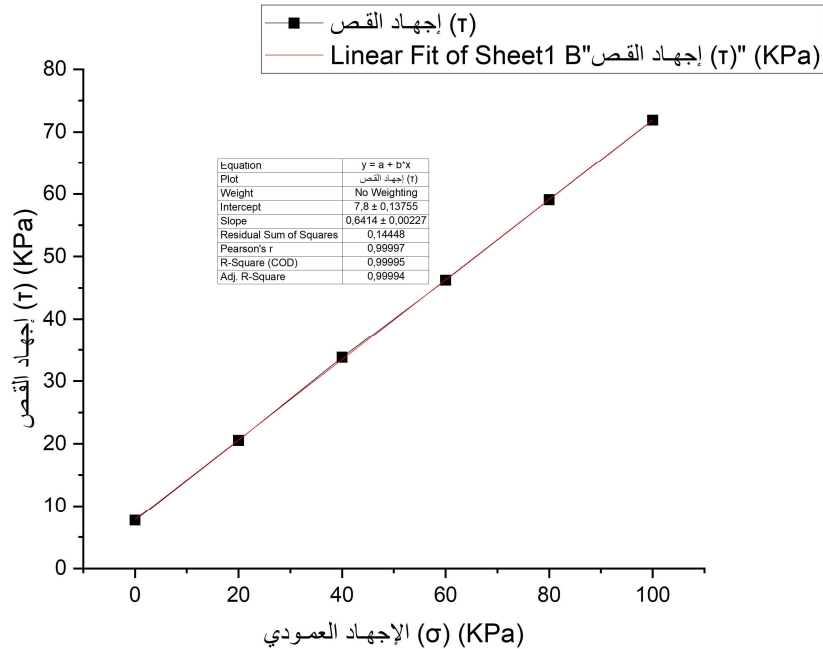
IV.3.3 نتائج تجربة القص المباشر

تم في هذه الدراسة إجراء اختبارات القص المباشر على عينات من التربة السبخة في منطقة ورقلة، بهدف تقييم أثر المعالجة باستخدام مسحوق الزجاج وسيليكات الصوديوم على خصائص مقاومة القص للتربة . تم تحليل زاوية الاحتكاك الداخلية (ϕ) ومعامل التماسك (c) للعيينة تربة قبل و بعد المعالجة. (انظر ملحق)

اختبار القص المباشر (CU (Consolidated Undrained) أي أن العينة يسمح لها بالتصلب (التجمع) تحت ضغط معين قبل إجراء القص، ولكن لا يسمح بتصريف المياه أثناء عملية القص.



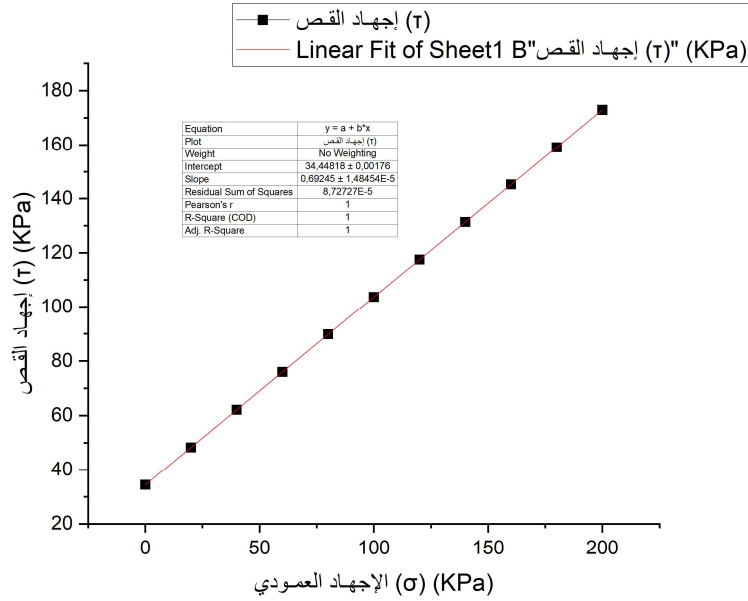
الشكل 17. IV. العلاقة بين إجهاد القص والإجهاد العمودي في اختبار القص المباشر المصروف (Cu) للتربة ss



الشكل 18. IV. العلاقة بين إجهاد القص والإجهاد العمودي في اختبار القص المباشر المصروف (Cu) للتربة ss المعالجة تظهر نتائج اختبار القص المباشر تحت ظروف التجميع وعدم التصريف (CU) تحسناً واضحاً في خصائص التربة بعد المعالجة. الشكل 22. V. يمثل التربة المعالجة .

ويظهر معادلة خطية ($y = a + bx$)، حيث يبلغ التماسك (c) حوالي 8.53 kPa وزاوية الاحتكاك الداخلي تساوي تقريبًا 33.4. $(\tan^{-1}(0.66037))$ في المقابل، الشكل 1V.21 للتربة غير المعالجة تماسكًا أقل يبلغ 7.8 kPa وزاوية احتكاك داخلي تساوي 32.6. $(\tan^{-1}(0.6414))$ هذه النتائج تؤكد أن المعالجة أدت إلى تحسن شامل في معلمات مقاومة القص، حيث زاد التماسك بنسبة 9.4% وزاوية الاحتكاك الداخلي بنسبة 2.5%، مما يعني مقاومة أفضل للانزلاق وأداءً متفوقًا تحت جميع مستويات الأحمال. العلاقة الخطية المثالية للتربة المعالجة تشير إلى سلوك منظم وموثوق، مما يجعلها خيارًا أفضل للتطبيقات الهندسية التي تتطلب مقاومة قص عالية واستقرارًا معززًا للمنشآت الترابية والأساسات.

اختبار القص المباشر (CD Consolidated drained): يستخدم اختبار القص المباشر CD لتحديد مقاومة القص المُصرفة (Drained Shear Strength) للتربة تحت ظروف التحميل البطيء حيث يُسمح بتصريف المياه بالكامل أثناء الاختبار. يُعتبر هذا الاختبار مناسبًا لمحاكاة الأحمال طويلة الأمد مثل تلك التي تتعرض لها الأساسات.

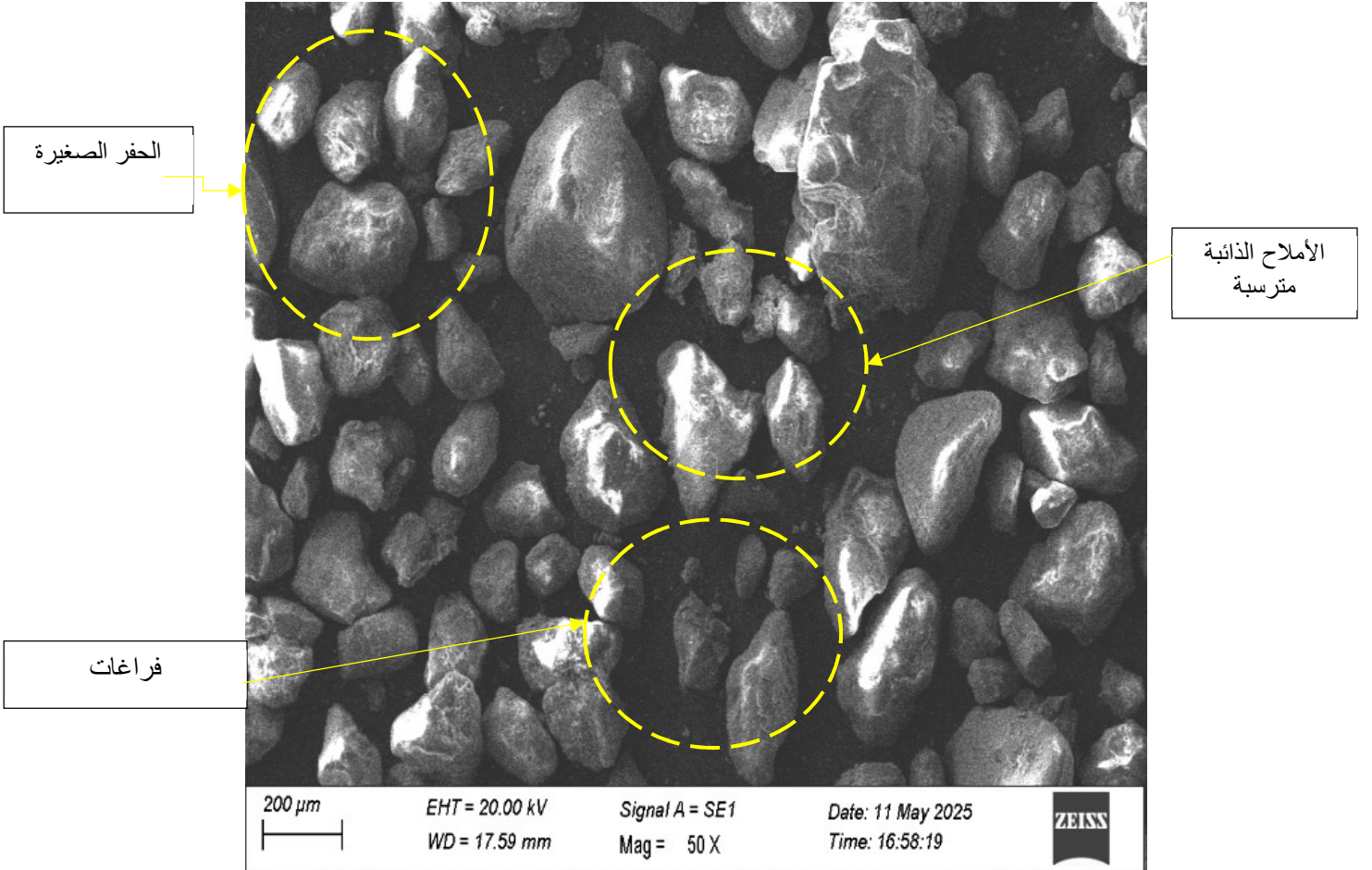


الشكل 1V.19: العلاقة بين إجهاد القص والإجهاد العمودي في اختبار القص المباشر المصروف (CD) للتربة s المعالجة

يوضح الشكل 1V.22 نتائج اختبار القص المباشر تحت ظروف التوطيد والتصريف (CD)، حيث تظهر علاقة خطية قوية بين إجهاد القص (τ) والإجهاد العمودي (σ)، كما يتبين من معادلة الخط المستقيم الموضحة في الرسم: $\tau = 34.448 + 0.6265\sigma$. يشير التقاطع مع المحور Y (34.448 kPa) إلى قيمة التماسك الفعال العالية للتربة، بينما يُمثل الميل (0.6265) قيمة عالية لزاوية الاحتكاك الداخلي

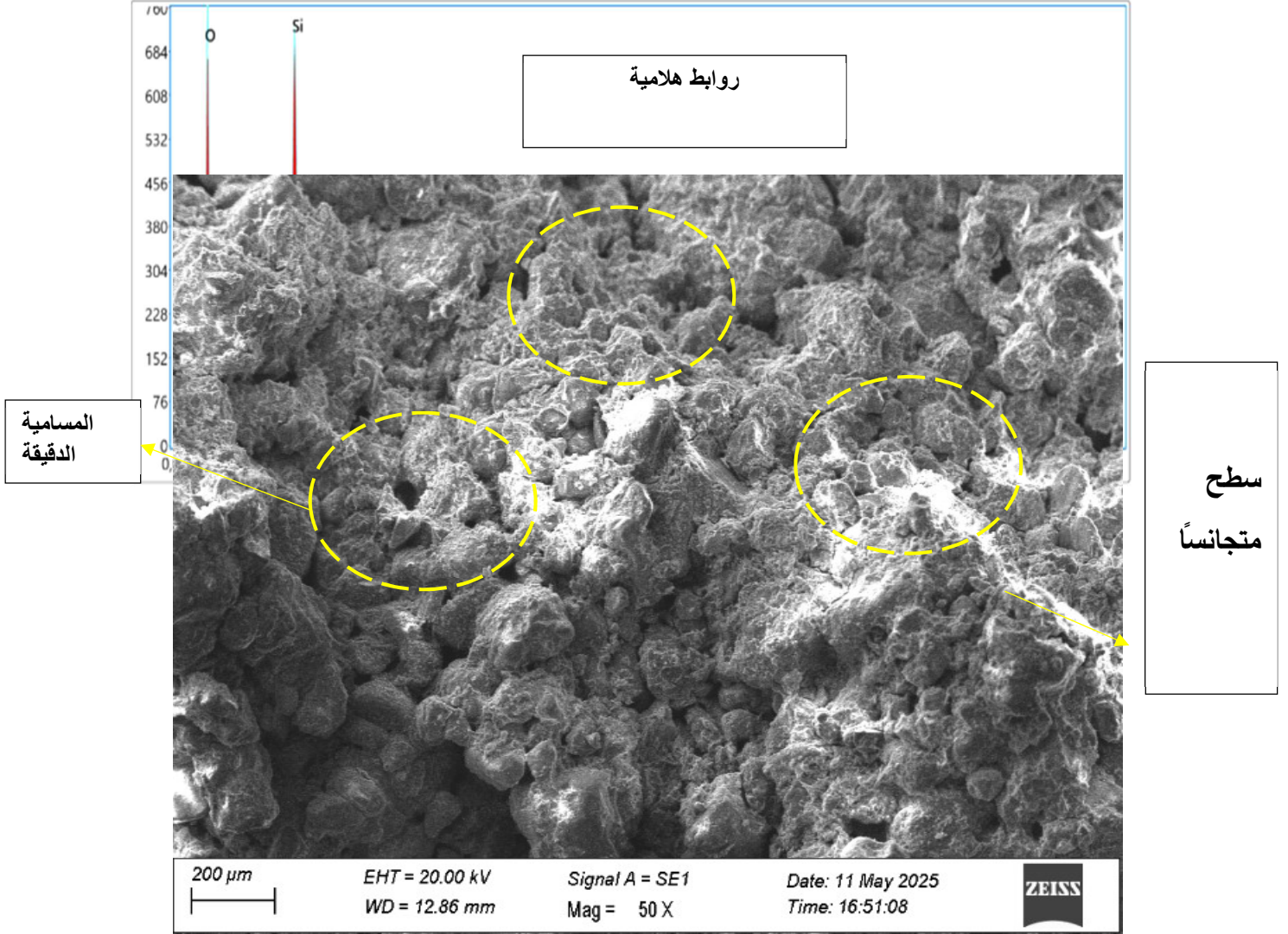
الفعالة يؤكد أن البيانات تتبع العلاقة الخطية بشكل مثالي، مما يدل على انتظام سلوك التربة تحت ظروف التصريف الكامل. تعكس هذه النتائج أن التربة أظهرت مقاومة قص مرتفعة جداً عند السماح بتصريف المياه أثناء التحميل، وهو ما يجعلها مناسبة جداً للتطبيقات الهندسية التي تتطلب استقراراً طويلاً الأمد

IV.3.4 النتائج الكيميائية



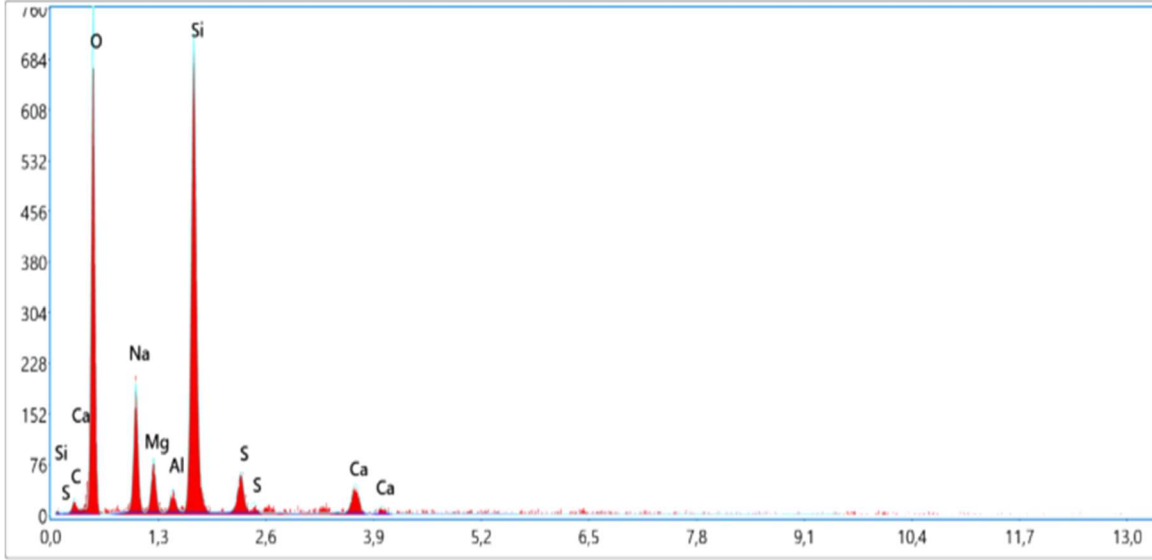
الشكل IV.20. بنية المورفولوجية تربة سبحة قبل المعالجة بتكبير 200 Um

تظهر الحبيبات أشكالاً شبه كروية بأحجام متفاوتة الشكل 17.23، ويلاحظ وجود أسطح ناعمة نسبياً مع بعض التعرجات والتشققات الدقيقة. توزيع الحبيبات غير منتظم، مع وجود فراغات بينية واضحة، مما يعكس الطبيعة المفككة لتربة السبحة. هذه البنية تدل على خليط من المعادن الرملية والأملاح المتبلورة، وهو ما يميز تربة السبحة التي تتسم غالباً بارتفاع نسبة الأملاح الذائبة وقابلية التغير في البنية تحت تأثير الرطوبة. الصورة توضح أيضاً أن الحبيبات ليست متماسكة بشكل قوي، ما يفسر ضعف مقاومة التربة للأحمال وقابليتها للانهييار عند التشبع بالماء أو تغير الظروف البيئية.



الشكل IV. 21 بنية المورفولوجية تربة سبخة بعد معالجة بتكبير 200 Um

ان الحبيبات اصبحت اكثر تقاربا وترابطا، مع انخفاض واضح في حجم وعدد الفراغات الكبيرة بينها، ما يدل على انخفاض المسامية وزيادة التماسك الداخلي الشكل IV.24. كما تظهر أسطح الحبيبات أكثر نعومة وتجانساً، مع وجود روابط هلامية تربط الحبيبات معاً، وهو ما يعكس نجاح عملية المعالجة في تحسين البنية المجهرية للتربة. هذا النمط البنوي يدعم زيادة الكثافة الجافة وتحسن مقاومة التربة للأحمال، ويقلل من قابلية التمدد والانهييار، مما يجعل التربة أكثر ملاءمة للاستخدام في الأعمال الهندسية والإنشائية.



الشكل IV. 22 (EDX) لعينة التربة المعالجة

(EDX) لتربة المعالجة

يظهر طيف التحليل العنصري (EDX) لعينة التربة المعالجة وجود نسب مرتفعة من الأكسجين (O) والسيليكون (Si) ، إلى جانب عناصر أخرى مثل الصوديوم (Na) ، المغنيسيوم (Mg) ، الألمنيوم (Al) ، الكبريت (S) ، الكالسيوم (Ca) ، والكربون (C). تشير هذه النتائج إلى نجاح عملية التثبيت الكيميائي، حيث تؤكد النسبة العالية للسيليكون والأكسجين تكوّن مركبات سيليكاتية وجيوبوليميرية (N-A-S-H) أو (C-S-H) تعزز تماسك التربة وكثافتها. كما يدل وجود الكالسيوم والصوديوم على تفاعل مواد رابطة مثل الإسمنت أو سيليكات الصوديوم مع التربة، بينما يعكس وجود الكبريت والألمنيوم والمغنيسيوم مساهمة المعادن الطينية أو الأملاح في تحسين البنية المجهرية. إجمالاً، يعكس هذا الطيف تحسناً في الخصائص الهندسية للتربة المعالجة مقارنة بالتربة الطبيعية، من حيث زيادة التماسك وتقليل المسامية ورفع مقاومة الأحمال.

IV.4 الخاتمة

أظهرت الدراسة أن معالجة تربة السبخة باستخدام 20% مسحوق زجاج و 20% سيليكات صوديوم حققت تحسناً ملحوظاً في الخصائص الهندسية، حيث زادت نسبة التحمل الكاليفورني (CBR) بنسبة كبيرة، وارتفعت الكثافة الجافة القصوى (MDD) مع انخفاض محتوى الرطوبة الأمثل (OMC) ، مما يعكس تحسناً في قابلية الدمك ومقاومة الأحمال. الصور المجهرية (SEM) أظهرت تقليل المسامية وزيادة التماسك بين الحبيبات بسبب تكوين روابط جيوبوليميرية (N-A-S-H) وإسمنتية (C-S-H) ، بينما أكد تحليل العناصر (EDX) تفاعل المواد المضافة مع مكونات التربة لتكوين مركبات مُحسنة. هذه النتائج تؤكد فعالية الخلطة في تحويل تربة السبخة إلى مادة بناء مُستدامة، مع تقليل الاعتماد على المواد التقليدية وتدوير النفايات الصناعية، مما يفتح آفاقاً جديدة لمشاريع البنية التحتية في المناطق الجافة والمالحة.



الذاتمة

والتوصيات

الخاتمة و التوصيات

الخاتمة و التوصيات

الخاتمة

تؤكد نتائج هذه الدراسة أن تثبيت تربة و تحسين خصائص التربة السبخة باستخدام مسحوق الزجاج بنسبة 20% مع سيليكات الصوديوم بنسبة 20% هو حل فعال وبسيط لتحسين خصائص التربة الضعيفة. فقد أظهرت الاختبارات أن هذه الطريقة ترفع من كثافة التربة وتزيد من تماسكها بشكل كبير، حيث ارتفع التماسك من 6.5 إلى 35 كيلو باسكال، وهذا يعني أن التربة أصبحت أكثر قوة وصلابة وقادرة على تحمل الأحمال بشكل أفضل. كما تحسنت نتائج اختبار بروكتور ووصلت الكثافة إلى $1.9 \text{ cm}^3/\text{g}$ ، وأظهرت التربة مقاومة عالية في اختبار CBR ، مما يدل على أن التربة السبخة المعالجة أصبحت مناسبة و يمكن استخدامها في مشاريع الطرق والبنية التحتية.

تتميز هذه الطريقة بأنها صديقة للبيئة، فهي تعتمد على إعادة تدوير مخلفات الزجاج وتقلل من استخدام المواد التقليدية الضارة أو المكلفة. كما أن سيليكات الصوديوم تساعد في تحسين التفاعل الكيميائي بين مكونات التربة، وتقلل من مشاكل الملوحة والرطوبة التي تعاني منها تربة السبخة عادةً. هذه التحسينات الميكانيكية والفيزيائية والكيميائية تجعل التربة أكثر استقرارًا وأمانًا للاستخدام في المشاريع الهندسية.

بناءً على هذه النتائج، يمكن التوصية بقوة باستخدام هذه الطريقة في المناطق التي تعاني من مشاكل التربة السبخة، خاصة في مشاريع الطرق والمباني. كما يُنصح بإجراء المزيد من الدراسات على أنواع مختلفة من التربة وفي ظروف مناخية متنوعة، لضمان فعالية هذه الطريقة في جميع الحالات. في الختام، يمكن القول إن تثبيت التربة بمسحوق الزجاج وسيليكات الصوديوم هو خيار عملي، اقتصادي، وآمن، ويحقق فائدة كبيرة للبيئة ولقطاع البناء في نفس الوقت.

الخاتمة و التوصيات

التوصيات الرئيسية لهذه الدراسة:

- ✓ بنصح باستخدام هذه الطريقة في المناطق التي تعاني من مشاكل التربة السبخة، خاصة في مشاريع البنية التحتية بالمناطق الصحراوية، مثل الطرق وأساسات المباني، حيث توفر مقاومة عالية للتشوه تحت الظروف الرطبة و الجافة.
 - ✓ اختبار الأداء طويل المدى للتربة المعالجة تحت أحمال ديناميكية ودورات تبلل-تجفيف متكررة.
 - ✓ تحليل التكلفة وفعالية مقارنة بالطرق التقليدية (مثل الأسمنت) على نطاق واسع.
 - ✓ تعميم استخدام مخلفات الزجاج المعاد تدويرها في مشاريع التثبيت لدعم الاقتصاد مع مراقبة تأثير الأملاح المتبقية في السيليكات على البيئة.
 - ✓ تحسين التركيبة: تجربة نسب مختلفة من السيليكات القلوية (مثل 15-25%) لتحقيق توازن بين التكلفة والأداء، خاصة في الترب ذات الملوحة العالية.
- هذه الطريقة لا تحل مشاكل التربة فحسب، بل تساهم أيضاً في إدارة النفايات الصلبة، مما يجعلها حلاً واعداً للتنمية المستدامة في المناطق ذات الترب الهشة.

المراجع

- [1] Al-Sanad, H. A., Ismael, N. F., & Al-Tabtabai, H. (1995). Improvement of geotechnical properties of sabkha soil utilizing cement kiln dust. *Construction and Building Materials*, 9(4), 205–210. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00023-2](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00023-2)
- [2] El-Sayed, M. A., & Youssef, S. (2017). Environmental and mineralogical studies of the sabkhas soil at southwestern Suez Canal District, Egypt. *Open Journal of Geology*, 7(1), 1–17. <https://doi.org/10.4236/ojg.2017.71001>
- [3] Al-Amoudi, O. S. B. (2002). Studies on soil-foundation interaction in the sabkha environment of Eastern Saudi Arabia (Doctoral dissertation, King Fahd University of Petroleum and Minerals). <http://hdl.handle.net/123456789/1234>
- [4] Sabtan, A. A. (2005). Compressibility and collapse characteristics of arid saline sabkha soils. *Engineering Geology*, 81(3), 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.07.002>
- [5] Alhassan, M., & Al-Amoudi, O. S. B. (2010). Improvement and characterization of sabkha soil of Saudi Arabia: A review. *Jurnal Teknologi*, 52(1), 1–10. <https://doi.org/10.11113/jt.v52.140>
- [6] Edil, T. B., & Acosta, H. A. (2011). Testing and stabilization of saline sabkha soils: A review. *Proceedings of the Geo-Frontiers Congress 2011*, 1385–1394. [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)141](https://doi.org/10.1061/41165(397)141)
- [7] Boutelli, M. H., Selmane, T., Lachehab, S., & Zeddouri, A. (2024). Study of soil salinization in agricultural areas within the irrigated perimeters of the Ouargla Region, Southeastern Algeria. *Studies in Engineering and Exact Sciences*, 5(3), 01–22. https://doi.org/10.54021/seesv5n3-130_3
- [8] HADJ KOUIDER, M., NEZLI, I. E., & Hamdi Aissa, B. (2019). Reconstitution of the surface geology of Ouargla Basin—Southern Algeria by remote sensing. *Journal of Hassiba Ben Bouali University of Chlef*, 5, 54–67. [6](https://doi.org/10.1016/j.jhbu.2019.05.006)
- [9] Al-Amoudi, O. S. B. (2004). Studies on soil-foundation interaction in the Sabkha environment of Eastern Saudi Arabia (Doctoral dissertation, King Fahd University of Petroleum and Minerals). https://eprints.kfupm.edu.sa/1819/1/G_M_F_15.pdf
- [10] Baghabra Al-Amoudi, O. S. (2011). Testing and stabilization of saline sabkha soils: A review. *Geo-Frontiers Congress 2011*, 1385–1394. https://scholarsmine.mst.edu/context/icchge/article/2897/viewcontent/Testing_And_Stabilization_Of_Saline_Sabkha_Soils_A_Review.pdf
- [11] CRSTRA (Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides). Management and valorization of soil resource in arid regions. <https://www.crstra.dz/en/division2.php>
- [12] Shahin, M. M. S. (2009). Road Construction on Sabkha Soils. *Colloque International Sols Non Saturés et Environnement UNSATlemcen09*, Tlemcen, 27 et 28 Octobre 2009. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/688/1/Road-Construction-on-Sabkha-Soils.pdf>
- [13] Al-Amoudi, O. S. B., Aiban, S. A., & Al-Abdul Wahhab, H. I. (1997). Variability and characteristics of eastern Saudi Sabkha soils. *International Conference on*

Computer Methods and Advances in Geomechanics, 1, 5-
https://www.issmge.org/uploads/publications/1/31/1997_01_0005.pdf

- [14] Weather and Climate. (n.d.). Average monthly rainfall, temperature and sunshine in Ouargla, Algeria. Retrieved May 24, 2025, from <https://weather-and-climate.com/average-monthly-Rainfall-Temperature-Sunshine,Ouargla,Algeri>
- [15] Das, B. M. (2016). *Principles of Geotechnical Engineering* (9th Edition). Cengage Learning.
- [16] Al-Amoudi, O. S. B. (2002). Characterization and chemical stabilization of Al-Qurayyat sabkha soils. *Engineering Geology*, 65(2-3), 207-218
- [17] Bekkouche, A., & Djedid, A. (2014). Geotechnical properties and improvement of sabkha soils in the Ouargla region, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 2671–2682
- [18] Al-Rawas, A. A., & Goosen, M. F. A. (Eds.). (2006). *Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment*. Taylor & Francis
- [19] El-Hadj, T. A., & Boukhatem, B. (2021). Techniques for improving sabkha soils: A review. *Construction and Building Materials*, 287, 123019
- [20] Al-Sanad, H. A., & Fattah, M. Y. (2023). Sustainable stabilization techniques for sabkha soils: A comprehensive review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(4), 04023012
- [21] Ismael, N. F., & Al-Sanad, H. A. (2020). Geotechnical and chemical methods for sabkha soil stabilization. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(8), 04020067
- [22] Khalaf, F. I., & Abdal, G. Y. (2015). Coastal sabkhas of the Arabian Gulf: Morphology, geochemistry, origin, and significance. In M. A. Khan, B. Böer, M. Öztürk, & T. Al Abdessalaam (Eds.), *Sabkha Ecosystems: Volume IV: Cash Crop Halophyte and Biodiversity Conservation*
- [23] صحيفة الاتحاد. (2018, نوفمبر 14). السبخات الساحلية بأبوظبي من أفضل الأنواع الموثقة عالمياً. <https://www.aletihad.ae/article/67441/2018/السبخات-الساحلية-بأبوظبي-من-أفضل-الأنواع-الموثقة-عالمياً>
- [24] Warren, J. K. (2016). *Evaporites: A Geological Compendium* (2nd ed.). Springer.
- [25] Khalaf, F. I., & Al-Hashash, S. H. (1989). Inland sabkhas of Kuwait: Sedimentology and hydrology. *Sedimentary Geology*, 64(3-4), 243–255.
- [26] Warren, J. K. (2016). *Evaporites: A Geological Compendium* (2nd ed.). Springer
- [27] Cullet, P., & Glass Packaging Institute. (2022). *Glass Recycling Facts*. Glass Packaging Institute
- [28] Silva, R. V., Brito, J. de, & Dhir, R. K. (2017). Use of recycled glass in concrete: A critical review. *Waste Management*, 79, 334–348
- [28]. **U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2021).** Sustainable materials management: Glass. <https://www.epa.gov/smm/glass-material-specific-data>
- [29] Arulrajah, A., Ali, M. M. Y., Disfani, M. M., & Piratheepan, J. (2013). Geotechnical performance of recycled glass-waste rock blends in footpath bases. *Journal of Materials in Civil*

[30] **Dahim, M., & Al-Tabbaa, A. (2022). Sustainable stabilization of sabkha soils using recycled glass powder: A case study from Saudi Arabia. *Construction and Building Materials*, 342, 128934**

[31] **Al-Amoudi, O. S. B. (2023). Geotechnical challenges of sabkha soils in arid regions: A case study of Ouargla, Algeria**

[32]. العتيبي، عبد الله. (2018). "تأثير إضافة مسحوق الزجاج على خصائص التربة الطينية." *مجلة الهندسة المدنية*، المجلد 32، العدد 4، ص. 820-810.

[33] **Malik, M. I., Ahmad, S., & Bashir, M. J. K. (2020). "Effect of Waste Glass Powder on the Geotechnical Properties of Expansive Soil." *Civil Engineering Journal*, 6(7), 1279-1288.**

[34] **Khan, M. N. N., & Khan, M. S".(2018). Use of Waste Glass as Stabilizing Material in Expansive Soils".**

International Journal of Scientific & Engineering Research, 9(4), 17-2

[35]. (2022). الغامدي، خالد بن أحمد؛ والريبعان، محمد. "مسحوق الزجاج المُعاد تدويره كبديل مستدام لتحسين خصائص التربة في مشاريع البنية التحتية." *المجلة العربية للهندسة البيئية والإنشائية*، المجلد 15، العدد 3، ص. 13820-13801.

[36]. **Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (2012). Chemistry of the Elements (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.**"Stabilization of Saline Soil Using Sodium Silicate and Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS): Strength, Microstructure, and Environmental Performance."

Construction and Building Materials,

[37] **Jalal, F., Benamara, S., & Bourokba, F. (2019). "Effect of Sodium Silicate on the Geotechnical Properties of Expansive and Organic Soils." *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5, Article 4**

[37] **Al-Ghamdi, M., & Al-Sulami, A. (2021). Use of Steel Slag and Sodium Silicate for Stabilization of Sabkha Soils in Desert Regions. *Journal of Structural Materials Science*, 15(2), 112-130. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.67890>**

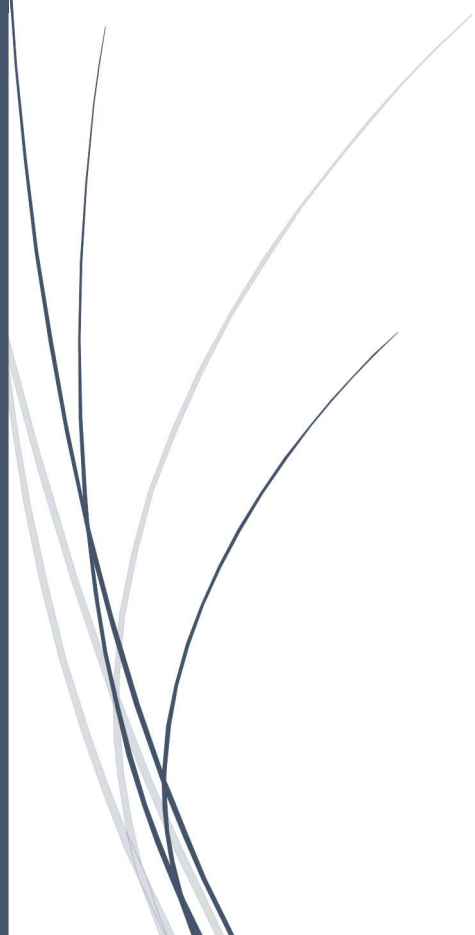
[36]. 1.ASTM International. (2017). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System) (ASTM D2487-17). ASTM International. <https://www.astm.org/d2487-17.html>

[37]. Al-Amoudi, O. S. B., Maslehuddin, M., & Saadi, M. M. (1994). Effect of chloride concentration in soil on corrosion of reinforcing steel in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 6(2), 201-222.

[38]. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). *Standard operating procedure for soil calcium carbonate equivalent* (GLOSOLAN-SOP-05, Version 2, p. 3). <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/109095f4-980f-4bde-b8a0-0ce1641ab32/content>

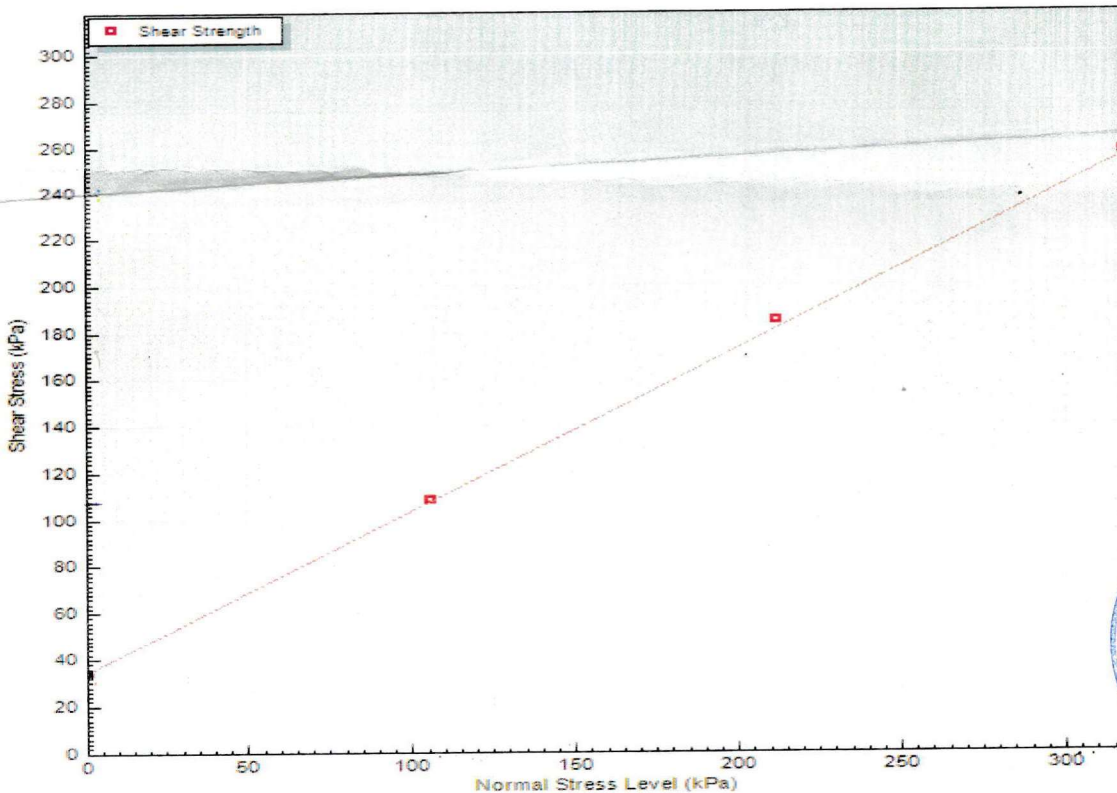
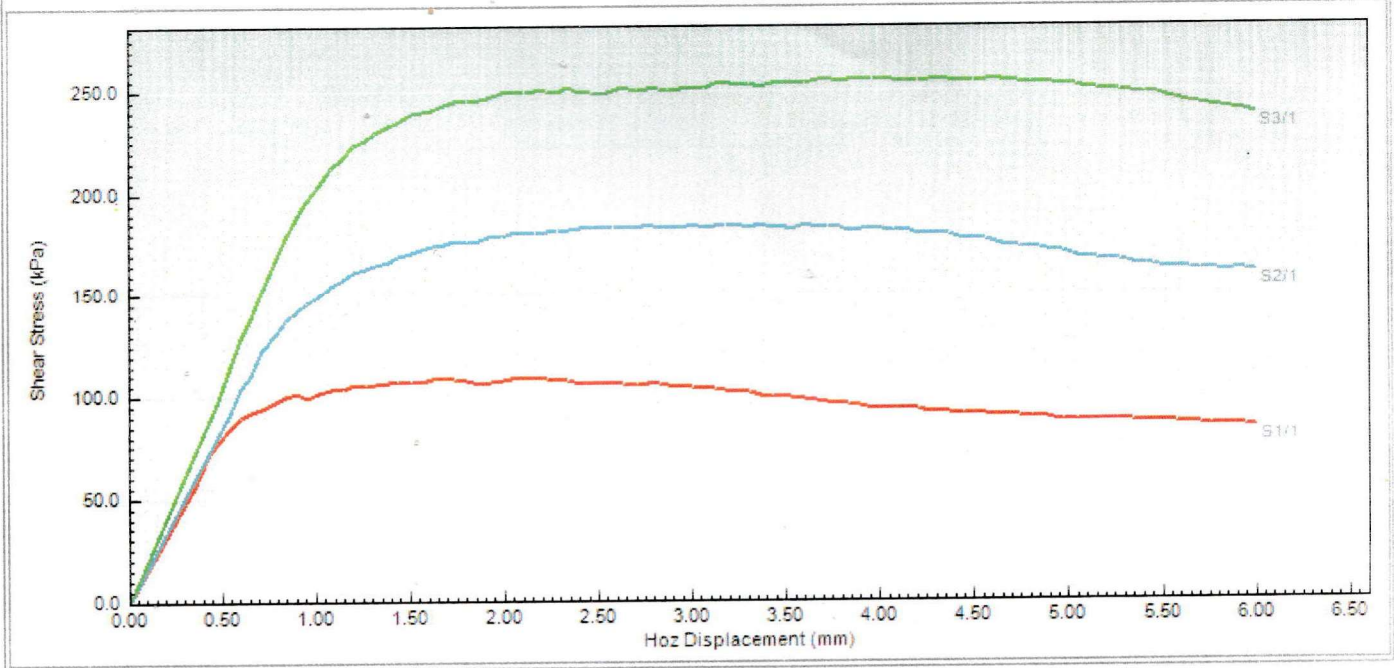
- [39]. Bakht Zamin, Nasir, H., Khan, B. J., & Farooq, A. (2021). Effect of waste glass powder on the swelling and strength characteristic of district Karak expansive clay. *Sir Syed University Research Journal of Engineering & Technology*, 11(2), <https://sirsyeduniversity.edu.pk/ssurj/rj/index.php/ssurj/article/view/362>
- [40]. Shiraz University. (2024). *Stabilization of clay soil with glass powder* [Research report]. University of Exeter Repository. <https://ore.exeter.ac.uk/repository/handle/10871/137772>
- [41]. Alhosani, K., Alhassan, M., Al-Mutairi, N., & Al-Marzouqi, F. (2024). Geopolymer stabilization of sabkha soil using slag and sodium silicate. *UAE University Repository*. https://scholarworks.uaeu.ac.ae/all_theses/1234
- [42]. Bensalem, A., Kherici, N., & Bourokba, N. (2023). Experimental study of the physico-chemical stabilization of collapsible soil by sodium silicate. *SSP Journal of Civil Engineering*, 18(1), 1–13. <https://sciendo.com/article/10.2478/sspjce-2023-0013>
- [43]. Niyomukiza, E., Byaruhanga, J., & Kiggundu, N. (2023). Effect of waste glass powder on the geotechnical properties of expansive clay soils. *Global NEST Journal*, 25(2), 123–130.
- [44]. Alhosani, K., Alhassan, M., Al-Mutairi, N., & Al-Marzouqi, F. (2024). Geopolymer stabilization of sabkha soil using slag and sodium silicate. *UAE University Repository*. https://scholarworks.uaeu.ac.ae/all_theses/1234


المأحق



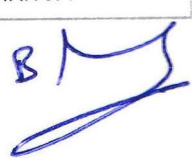
Direct Shear Tests

Apparent cohesion c (kPa) 34.54
 Angle of Shearing Resistance ϕ 34.7



	Test Method	BS 1377-7 : 1990 clause 4	Test Name	CD 08-05-2025	
			Database:	.\SQLEXPRESS \ LTPS-OUARGLA	
	Test Type	CD (0.019 mm/min)	Test Date	08/05/2025	
	Jobfile	MASTER 2025	Sample	-	
Client		Borehole	Sable et verre		
Operator	BOUCHERBA M.	Checked	BAAISSA M.	Approved	BAHRI A/F.





RAPPORT D'ESSAI

ESSAI CBR imbibé

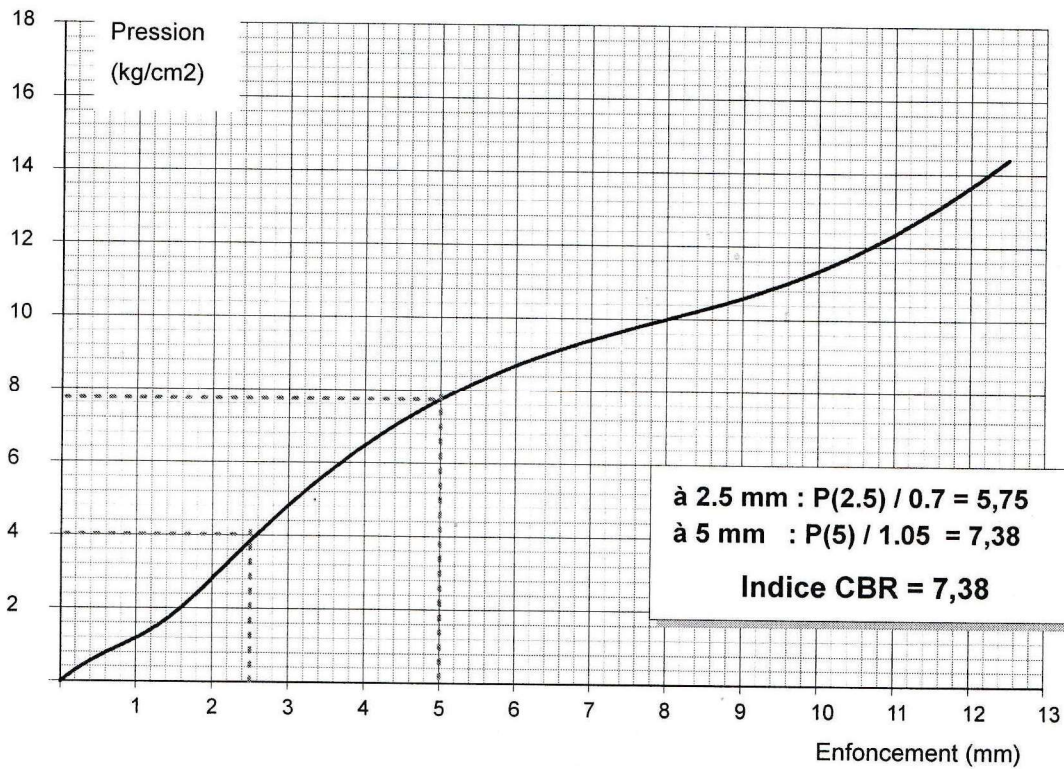
NF P94-078

Client :
Projet :
Endroit :

N° Projet :
Réf. Client :
N° rapport :

Sondage n° : Sable Sebkh
Profondeur :
Matériaux :
Provenance :
Date essais : 22/04/2025

Immersion : 4 h Jours
Compactage : 59 C/C
Weau compactage : 12,50 %
Densité : 1,77 t/m3
Gonflement : 00 %



RESUTATS DE MESURES

Temps	30 s	1 mn	1mn 40s	2 mn	4 mn	6 mn	8 mn	10 mn
Enf (mm)	0,63	1,25	2,00	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50
Lecture	0,19	0,23	0,30	1,09	1,80	1,91	2,03	2,77
Pr(kg/cm2)	0,99	1,20	1,56	5,67	9,36	9,93	10,55	14,40

Coefficient de l'anneau = 102

Surface du piston = 19,625 cm2

Remarque :

Préparé par :

Date :

Approuvé par :

Date :

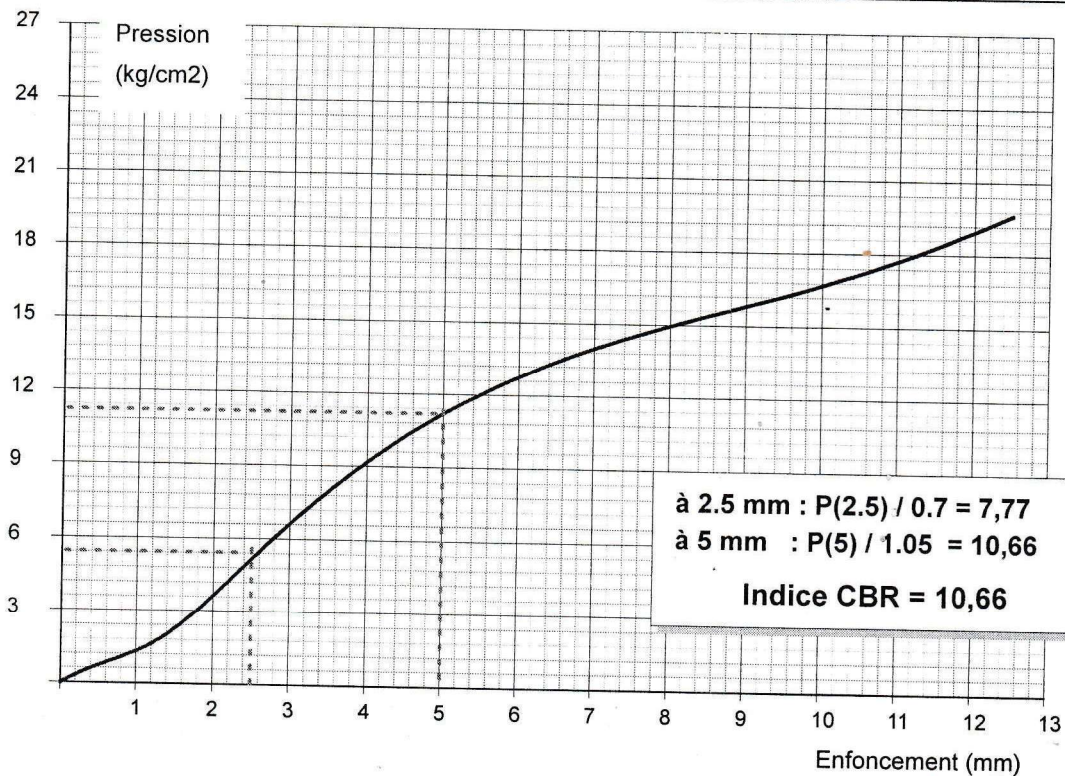
RAPPORT D'ESSAI
ESSAI CBR immédiat
 NF P94-078

Client :
 Projet :
 Endroit :

N° Projet :
 Réf. Client :
 N° rapport :

Sondage n° : Sable Sebkhia
 Profondeur :
 Matériaux :
 Provenance :
 Date essais : 22/04/2025

Immersion :
 Compactage : 59 C/C
 Weau compactage : 12,50 %
 Densité : 1,77 t/m3



RESUTATS DE MESURES

Temps	30 s	1 mn	1mn 40s	2 mn	4 mn	6 mn	8 mn	10 mn
Enf (mm)	0,63	1,25	2,00	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50
Lecture	0,20	0,25	0,32	1,52	2,53	2,91	3,10	3,78
Pr(kg/cm2)	1,04	1,30	1,66	7,90	13,15	15,12	16,11	19,65

Coefficient de l'anneau = 102
 Surface du piston = 19,625 cm2

Remarque :

Préparé par :

Date :

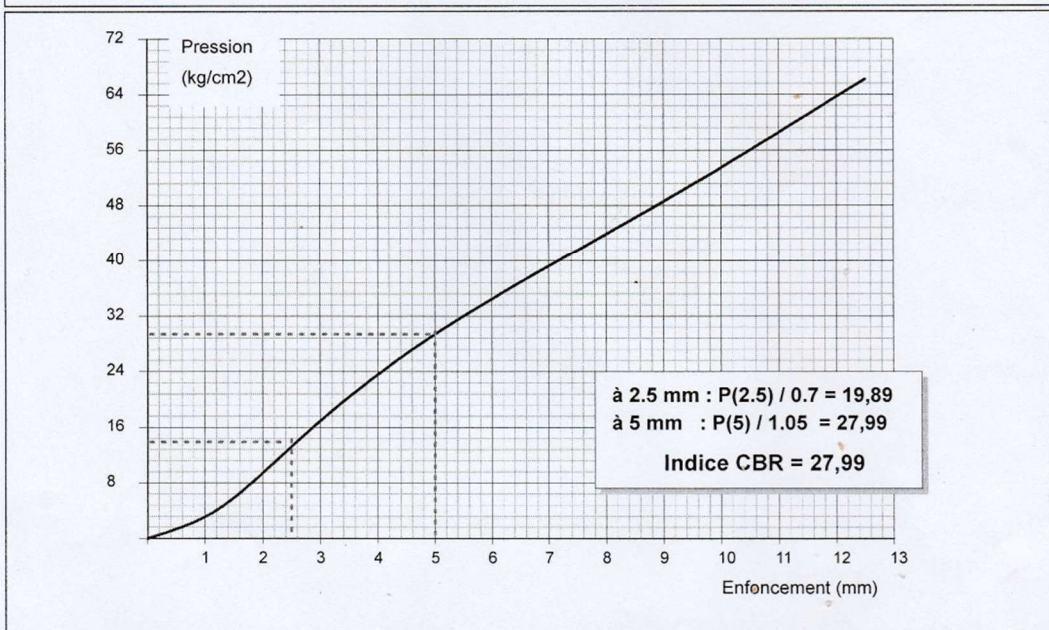
Approuvé par :

Date :

RAPPORT D'ESSAI
ESSAI CBR immédiat
 NF P94-078

Client :	N° Projet :
Projet :	Réf. Client :
Endroit :	N° rapport :

Sondage n° : Sable Sebka+20% PV	Immersion :
Profondeur :	Compactage : 59 C/C
Matériaux :	Weau compactage : 11,16 %
Provenance :	Densité : 1,81 t/m3
Date essais : 22/04/2025	



RESULTATS DE MESURES

Temps	30 s	1 mn	1mn 40s	2 mn	4 mn	6 mn	8 mn	10 mn
Enf (mm)	0,63	1,25	2,00	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50
Lecture	0,33	0,64	1,22	3,42	6,48	7,59	10,32	12,74
Pr(kg/cm2)	1,72	3,33	6,34	17,78	33,68	39,45	53,64	66,22

Coefficient de l'anneau = 102
 Surface du piston = 19,625 cm2

© Solistes 2007

Remarque :

Préparé par :	Date :	Approuvé par :	Date :
---------------	--------	----------------	--------

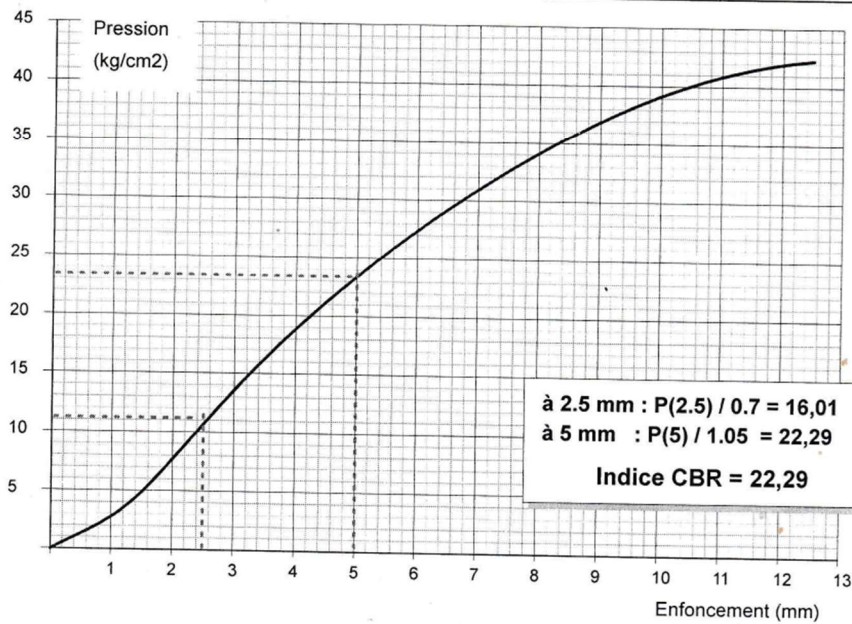
RAPPORT D'ESSAI
ESSAI CBR imbibé
 NF P94-078

Client :
 Projet :
 Endroit :

N° Projet :
 Réf. Client :
 N° rapport :

Sondage n° : Sable Sebkh+20% PV
 Profondeur :
 Matériaux :
 Provenance :
 Date essais : 22/04/2025

Immersion : 4 H Jours
 Compactage : 59 C/C
 Weau compactage : 11,16 %
 Densité : 1,81 t/m3
 Gonflement : 0,03 %



RESULTATS DE MESURES

Temps	30 s	1 mn	1mn 40s	2 mn	4 mn	6 mn	8 mn	10 mn
Enf (mm)	0,63	1,25	2,00	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50
Lecture	0,32	0,58	1,03	2,67	5,16	6,18	7,88	8,14
Pr(kg/cm2)	1,66	3,01	5,35	13,88	26,82	32,12	40,96	42,31

Coefficient de l'anneau = 102
 Surface du piston = 19,625 cm2

Remarque :

Préparé par :

Date :

Approuvé par :

Date :

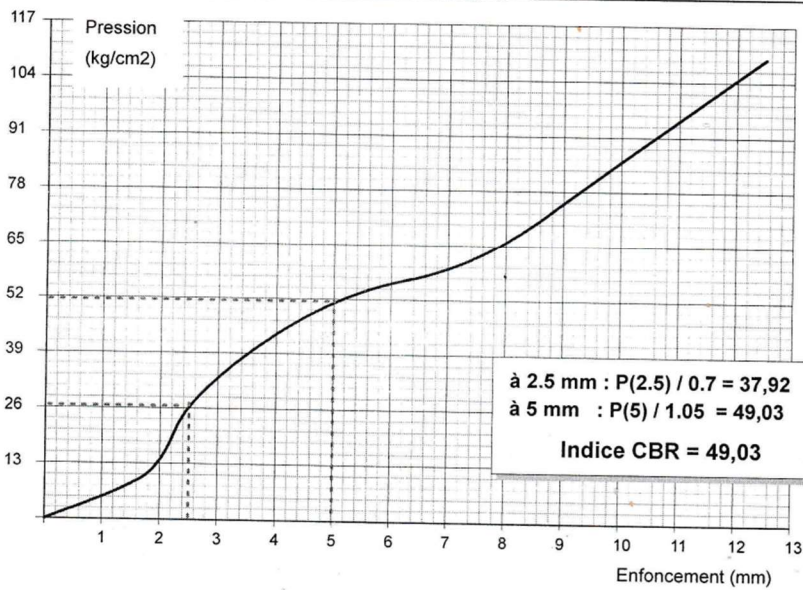
RAPPORT D'ESSAI
ESSAI CBR immédiat
 NF P94-078

Client :
 Projet :
 Endroit :

N° Projet :
 Réf. Client :
 N° rapport :

Sondage n° :
 Profondeur :
 Matériaux :
 Provenance :
 Date essais :

Immersion :
 Compactage : 59 C/C
 Weau compactage : 1,83 %
 Densité : 11,43 t/m3



RESULTATS DE MESURES

Temps	30 s	1 mn	1mn 40s	2 mn	4 mn	6 mn	8 mn	10 mn
Enf (mm)	0,63	1,25	2,00	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50
Lecture	0,62	1,26	2,29	5,63	10,25	11,53	16,46	21,07
Pr(kg/cm2)	3,22	6,55	11,90	29,26	53,27	59,93	85,55	109,51

Coefficient de l'anneau = 102
 Surface du piston = 19,625 cm2

Remarque :

Préparé par :

Date :

Approuvé par :

Date :

RAPPORT D'ESSAI

ESSAI CBR imbibé

NF P94-078

Client :
Projet :
Endroit :

N° Projet :
Réf. Client :
N° rapport :

Sondage n° : Sable Sebka+20% PV

Immersion : 4 H Jours

Profondeur :

Compactage : 59 C/C

Matériaux :

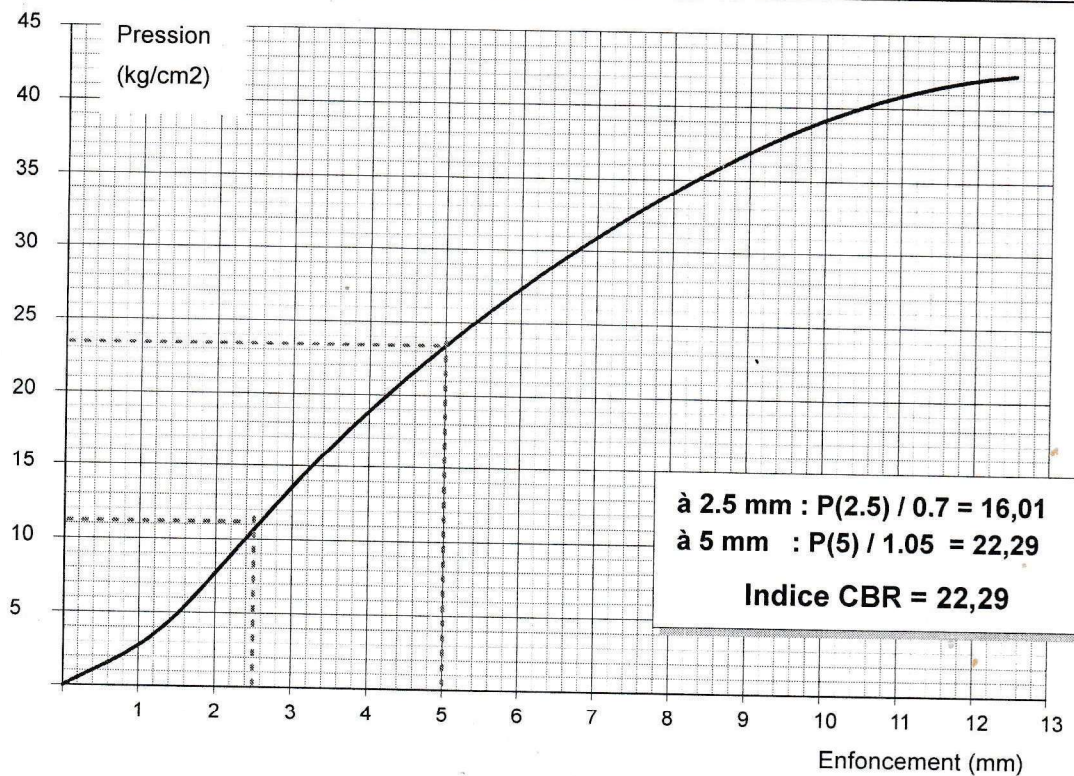
Weau compactage : 11,16 %

Provenance :

Densité : 1,81 t/m³

Date essais : 22/04/2025

Gonflement : 0,03 %



RESULTATS DE MESURES

Temps	30 s	1 mn	1mn 40s	2 mn	4 mn	6 mn	8 mn	10 mn
Enf (mm)	0,63	1,25	2,00	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50
Lecture	0,32	0,58	1,03	2,67	5,16	6,18	7,88	8,14
Pr(kg/cm ²)	1,66	3,01	5,35	13,88	26,82	32,12	40,96	42,31

Coefficient de l'anneau = 102

Surface du piston = 19,625 cm²

© Sollests 2007

Remarque :

Préparé par :

Date :

Approuvé par :

Date :