# تـأثيـر التربة الناعمة علـى الـخـواص الـهـندسـية للـتربـة الرمـليـة

جمال منصور الشريف[1]، مريم جابر[2]، رؤى حسن سويسي[1]

1 قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة طرابلس، ليبيا، j.alsharef@uot.edu.ly , https://orcid.org/0000-0003-0280-4750

2 الهيئة الوطنية للبحث العلمي، ليبيا

**الملخص**: يُعد تحسين الخصائص الهندسية للتربة أحد التحديات الرئيسية في مجال هندسة التربة، خاصة عند تصـميم الأسس الإنشائية على التربة الرملية، التي غـالبًا ما تكـون ضعيفة التحـمل والـقدرة على الدعم. تهدف هذه الورقة البحثية إلى تحليل تأثير إضافة التربة الناعمة بنسب مختلفة (4%، 8%، 16%) إلـى التربة الرملية، وتحديد مدى تـأثيره على خـصائص التربة الفـيزيائية والـميكانيكية، بهدف تحسـين استقرار التربة وتحملها للأحمال، وبالتالي تحسين أداء الأسس المبنية عليها . تم إجراء سـلسلة من الاختبارات على التربة الرملية و التربة الناعمة المضافة. شملت الاختبارات الفيزيائية للتربة الرملية الـتحليل المنـخـلـي، والـذي أظـهـر أن التربة رملية طميية، بالإضـافـة إلى قيـاس الـوزن الـنوعي. أما الاخـتبارات الميـكانيكية فقد تضـمنت اختبار الدمـك القياسي، الذي أعـطى وحـدة وزن جـافة قدره 17 **KN/m³** ، واختبار القص المباشر لتحديد زاوية الاحتكاك والتماسك. كما تم اختبار الدمك والقص للطمي لـتحديد تأثيره عند إضـافته لـلتربة الرملية . أظهرت النتائج أن إضافة 4% من التربة الناعمة خفضت وحدة الوزن الجافة للتربة إلـى 16.9 **KN/m³** ، وزادت زاويـة الاحتـكاك إلى 35.678° ، وبلغ التـماسـك 4.22 . **Kpa** عـند إضافة 8% من التربة الناعمة كانت وحدة الوزن الجافة مساوية لوحدة الوزن الجافة للتربة بدون إضافات 17 **KN/m³** ولكن زاوية الاحتكاك انخفضت إلى 32.639°، وارتفع التماسك إلى17.947 . **Kpa** أما عند إضـافة 16% من التربة الناعمة، فقد زادت وحدة الوزن الجافة بشكل ملحوظ إلى 18.74 **KN/m³** ، وارتفعت زاوية الاحتكاك إلى 34.11° ، بينما بلغ التماسك 37.867 .**Kpa** تشير هذه النتائج إلى أن إضافة التربة الناعمة إلى التربة الرملية يمكن أن يؤدي إلى تحسينات ملحوظة في الخصائص الميكانيكية للتربة، مما يسـاهم في زيادة اسـتقرار الأسس المبنية على هذه التربة وتحسين قدرتها على تحمل الأحمال.

الكلمات المفتاحية: تحسين التربة، التربة الرملية، التربة الناعمة، الخواص الهندسية للتربة.

**الكلمات المفتاحية:** تحسين التربة، التربة الرملية، التربة الناعمة، الخواص الهندسية للتربة.

# Effect of soft soil on the engineering properties of sandy soil

Jamal Alsharef1, Maryam Gaber2, Roaa Hassan Swaissi1

1 Department of Civil Engineering, University of Tripoli, Libya, , j.alsharef@uot.edu.ly, https://orcid.org/0000-0003-0280-4750

2 Libyan authority for scientific research, Libya

**Abstract** Improving the geotechnical properties of soil remains one of the primary challenges in the field of geotechnical engineering, particularly when designing structural foundations on sandy soils, which often exhibit low bearing capacity and limited support strength. This research paper aims to analyze the effect of adding fine soil in varying proportions (4%, 8%, and 16%) to sandy soil and to assess its impact on the physical and mechanical properties of the soil. The objective is to enhance soil stability and load-bearing capacity, thereby improving the performance of foundations constructed on such soils. A series of laboratory tests were conducted on both the sandy soil and the fine soil additives. Physical tests on the sandy soil included sieve analysis, which classified the soil as silty sand (SM), in addition to specific gravity measurement. Mechanical tests included the Standard Proctor compaction test, which yielded a maximum dry density of 17 KN/m³, and the direct shear test, which was used to determine the angle of internal friction and cohesion. Compaction and shear tests were also conducted on the fine soil to determine its effect when blended with sandy soil. the results showed that the addition of 4% fine soil reduced the dry unit weight to 16.9 KN/m³, increased the internal friction angle to 35.678°, and yielded a cohesion value of 4.22 Kpa. When 8% fine soil was added, the dry unit weight remained at 17 KN/m³ (equal to the unmodified sandy soil), but the internal friction angle decreased to 32.639°, while cohesion increased to 17.947 kPa. With a 16% addition of fine soil, the dry unit weight significantly increased to 18.74 kN/m³, the internal friction angle rose to 34.11°, and cohesion reached 37.867 Kpa.

Keywords: Soil Improvement, Sandy soil, Soft Soil, Soil Engineering Properties

## 1.**المقدمة :**

تعتبر الرمال أحد أنواع التربة الرئيسية التي حظيت باهتمام الباحثين بشكل مباشر لكثرة تواجدها في موقع مختلفة. و هي تتميز بتركيبها الرملي حيث تتراوح احجام الرمل فيها بين 0.05 mm الى 2 mm تقريبا [1] . عدم الاهتمام بالدراسات الهندسية على التربة الرملية يمكن ان يؤدي عدة تحديات و مشاكل ، للتغلب على ضعف الترب الرملية يمكن استخدام إضافة عامل أضافي أو استخدام طريقة التثبيت الميكانيكي لتحسين خواص التربة [2] . احد المواد المضافة التي يمـكن استخدامها لأغراض التثبيت هي التربة الناعمة و هي مادة متوفرة طبيعيا و رخيصة التكاليف، فهي متوفرة بكثرة بتوزيع مختلف على بقاع الـــبلاد لذلك تعتبر إضافة جيدة للتـــــربة الرملية و اقتصادية بسبب توفرها الطبيعي و على مساحات شاسعة. إضافة التربة الناعمة الى الرمل يمكن ان يؤثر على خصائص الرمل بشكل ملحوظ. عادة ما يتم إضافـــــة التربة الناعمة لتحسين قوة الرمل و ثباته ، و لكن هذا يعتمد على النسب المضافة. و بسبب صغر حجـــــم حبيبات التربة الناعمة فهو يعـــــمل كمادة مالئة بالنسبة للتربة الرملية بسبـــــب كبر حجم حبيـــــباتها و كـــــثرة الفراغات لذا فالتربة الناعمة يملئ هذه الفراغات و يؤدي الى زيادة التماســـــك بـــسبب المحـــــتوى العالي مـــــن الجزيئات الدقيقة .

داود وآخرون(2016) درسو تأثير زيادة المحتوى الناعم (مثل الطمي) على خصائص التربة الرملية، حيث أظهرت نتائج التجارب أن حد السيولة وحد اللدونة يرتفعان مع زيادة نسبة الطمي. فعلى سبيل المثال، عند إضافة 20% طمي، كانت قيمة حد السيولة 23.96% وبلغت الكثافة الجافة 1.62 $Mg/m^3$، بينما عند إضافة 40% طمي، ارتفعت قيمة حد السيولة إلى 24.78% وانخفضت الكثافة الجافة إلى 1.69 $Mg/m^3$،كما أظهرت التجارب انخفاض زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة مع زيادة الطمي. تعكس هذه النتائج تأثير زيادة المحتوى الناعم في التربة على تحسين التماسك وتغيير خصائص الاحتكاك الداخلي، مما يبرز الدور الذي تلعبه الجزيئات الناعمة في تعديل السلوك الهندسي للتربة[3] .
و في دراسة أخرى جينبو لي وآخرون (2021) هدفت إلى تحسين الخصائص الهندسية للرمل، تم إضافة نسب مختلفة من الطمي (5%، 10%، 20%) إلى الرمل، وتم تقييم تأثير ذلك على زاوية الاحتكاك الداخلي والتماسك باستخدام اختبار القص المباشر. صُنفت التربة الرملية على أنها جيدة التدرج (SW)، وكانت الكثافة الجافة للرمل 1.85 $g/cm^3$ والمحتوى المائي الأمثل 1.28%، بينما بلغت الكثافة الجافة للطمي 1.43 $g/cm^3$ والمحتوى المائي الأمثل 6.2%. عند الكثافة القصوى، زادت زاوية الاحتكاك والتماسك مع زيادة نسبة الطمي، حيث ارتفعت زاوية الاحتكاك من 28.462° للرمل النقي إلى 37.525° عند إضافة 20% طمي، بينما زاد التماسك من 0.951 Kpa إلى 4.126 Kpa . أما عند المحتوى المائي الأمثل، فقد كانت زاوية الاحتكاك والتماسك أقل عمومًا، لكنها أظهرت تحسنًا مع إضافة الطمي، حيث ارتفعت زاوية الاحتكاك من 27.144° إلى 39.943° والتماسك من 0.27 Kpa إلى 2.856 Kpa مع إضافة 20% طمي. أظهرت النتائج تأثيرًا إيجابيًا لإضافة الطمي على تحسين الخواص الميكانيكية للرمل، مما يدعم استخدام هذه التقنية لتحسين استقرار التربة في التطبيقات الهندسية[4] . كما تناول رضا (2019) تأثير إضافة الطمي (ML) بنسب مختلفة (10%، 30%، 50%) إلى الرمل (SP) على الخصائص الميكانيكية للتربة. تم تقييم قوة القص وزاوية الاحتكاك الداخلي باستخدام اختبار القص المباشر تحت أحمال مختلفة (50,100,200 Kpa). أظهرت النتائج أن قوة القص القصوى وزاوية الاحتكاك الداخلي للعينات الرملية تزداد بزيادة محتوى الطمي حتى 10%، حيث زادت قوة القص عند حمل 50 Kpa من 60 إلى 65 Kpa ، وعند حمل 100 Kpa من 100 إلى 110 Kpa ، وعند حمل 200 Kpa من 170 إلى 180 Kpa ، كما ارتفعت زاوية الاحتكاك الداخلي من 36° للرمل إلى 38°. ومع ذلك، مع زيادة نسبة الطمي إلى 30% و50%، انخفضت قوة القص وزاوية الاحتكاك الداخلي تدريجيًا، حيث وصلت زاوية الاحتكاك إلى 33° و31° على التوالي، مما يعكس تأثيرًا سلبيًا لإضافة الطمي بنسب كبيرة [5].
الهدف الاساسي هذا البحث إلى تحسين الخواص الهندسية للتربة الرملية، خصوصًا زيادة مقاومة القص ووحدة الوزن الجافة، لما لهاتين الخاصيتين من تأثير كبير على استقرار وتصميم أسس المنشآت الهندسية. لتحقيق هذا الهدف، تم دراسة تأثير إضافة التربة الناعمة كمادة مالئة بنسب مختلفة (4%، 8%، 16%) إلى التربة الرملية، حيث تسهم حبيباتها الدقيقة في إعادة ترتيب البنية الحبيبية وتقليل الفراغات بين الحبيبات الكبيرة. هذا التعديل يؤدي إلى زيادة تماسك التربة وكثافتها، مما يعزز من كفاءتها الإنشائية ويتيح استخدامها بشكل أفضل في التطبيقات الجيوتكنيكية.

## 2. المنهجية

**1.2 التربة** : التربة المستخدمة في الدراسة هي تربة رملية كما موضح في (شكل 1) تم أخذها من منطقة ( وسعاية البديري–طرابلس–ليبيا ) لإجراء الاختبارات الفيزيائية و الميكانيكية و دراسة تأثير الإضافات عليها ، و يعرض ( جدول 1 ) الخواص الفيزيائية للتربة الرملية .

**جدول 1. الخواص الفيزيائية للتربة الرملية**

| | |
|---|---|
| الشكل | تتكون بشكل رئيسي من حبيبات رملية |
| الحجم | قطرها بين 0.05 mm , 2 mm |
| الوزن النوعي | 2.6446 |
| محتوى الحبيبات الدقيقة | %14.534 |
| القابلية للتماسك | منخفضة |
| زاوية الاحتكاك | °34 |
| المحتوى المائي الأمثل | %14 |
| وحدة الوزن الجافة | 17 $KN/m^3$ |

**2.2 التربة الناعمة (المضافة):** هي مادة طبيعية تتكون من جسيمات صغيرة جداً من الطين و الطمي حيث ان التربة الناعمة المستخدم في هذه الدراسة من الجنوب الليبي و بالتحديد براك الشاطئ و كانت من على عمق 3.5م . ( الشكل 2 ) يوضح الشكل الطبيعي للتربة الناعمة . و الخواص الفيزيائية و الكيميائية للتربة الناعمة موضحة في ( جدول 2) .

**جدول 2. الخواص الفيزيائية و الكيميائية للتربة الناعمة (المضافة) الناعمة**

| | |
|---|---|
| التراكيب الكيميائية | أكسيد السيليكون $SiO_2$ ، سيليكات الألمونيوم و البوتاسيوم K ( $Al\ Si_3\ O_8$ ) |
| الحجم | اقل من 0.05 mm و اكبر من 0.002 mm |
| الوزن النوعي | 2.769 |
| القابلية للتماسك | 58.181 Kpa |
| زاوية الاحتكاك | منخفضة |
| المحتوى المائي الأمثل | 16.8% |
| وحدة الوزن الجافة | 17.2 $KN/m^3$ |
| نسبة الكلوريد CL | 0.4118 |
| نسبة الكبريتات $SO_3$ | 0.2395 |
| الاس الهيدروجيني PH | 6.75 |

**2.2 إعداد العينات :**
تم اعداد 4 عينات مختلفة ، العينة الأولى كانت التربة الرملية بدون إضافات ، الثلاث عينات الأخرى تم إضافة التربة الناعمة بنسب مختلفة و هي 4% ، 8% و 16% .

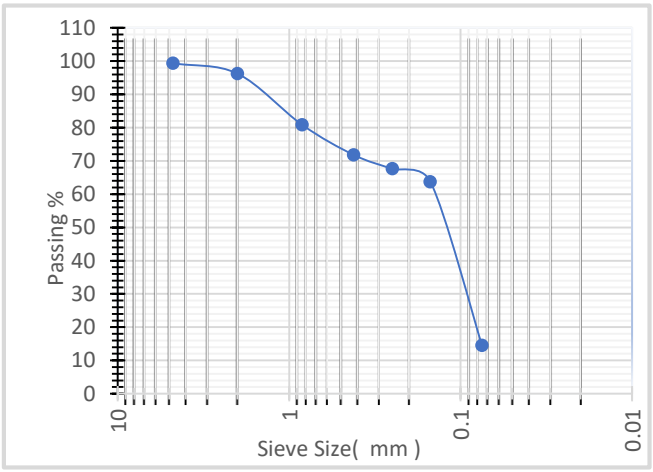
DOI:10.5281/zenodo.17778740

**شكل 1. شكل التربة الرملية خالية من الاضافات**

**شكل 2. شكل التربة الناعمة**

## 3. النتائج

**1.3 التحليل المنخلي :** تم اجراء الاختبار وفقاً للمواصفة الامريكية القياسية ( ASTM D-421) لتحديد حجم التربة الرملية و التربة الناعمة ، أظهرت نتائج هذا الأختبار ( شكل 3 ) ان تدرج هذه التربة الرملية يعتبر ضعيفا وفقا للتصنيف الموحد ، حيث تصنف على انها تربة رملية طمية SM ) ( . كان قوام العينة يحتوي على نسب من الرمل و الطمي و الطين و الحصى:
Gravel = 0.619% , Sand = 84.847% , Silt and Clay = 14.534%
NON-PLASTIC SOIL




**شكل 3. منحنى التدرج الحبيبي للتربة الرملية**

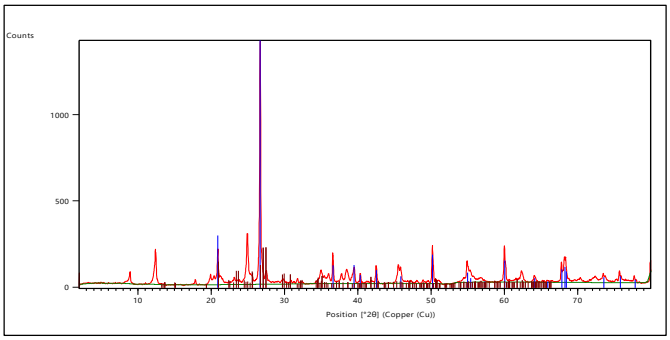
**2.3 اختبار الوزن النوعي :** تم اجراء الاختبار على المواصفة القياسية الامريكية ( ASTM D-854 ) لتحديد الوزن النوعي للتربة الاصلية و التربة المضافة . تم اجراء الاختبار لعينة التربة الرملية بدون إضافات ثلاث مرات لضمان دقة النتائج ، العينة 1 كانت قيمة الوزن النوعي 2.65 و العينة 2 كانت قيمة الوزن النوعي 2.66 و العينة الثالثة كانت قيمة الوزن النوعي 2.63 ، الوزن النوعي للثلاث عينات كانت متقاربة و هذا يعني تجانس التربة . تم اخذ متوسط قيم الثلاث عينات و كانت القيمة 2.647 و بعد التصحيح 2.6446 ، النتائج أظهرت ان الوزن النوعي للتربة الرملية المقاسة يقع ضمن القيم الطبيعية للتربة الرملية ، مما يشير الى أن التربة متماسكة الى حد ما و متجانسة في خواصها الفيزيائية .
أما بالنسبة للتربة الناعمة العينة 1 كانت قيمة الوزن النوعي 2.75 . العينة 2 كانت قيمة الوزن النوعي 2.84، العينة 3 كانت قيمة الوزن النوعي 2.72. القيم الثلاث تشير الى أن التربة تحتوي على خليط من الحبيبات التي تختلف كثافتها قليلاً ، و هو أمر شائع في التربة الناعمة ، حيث يمكن ان تحتوي على معادن مختلفة بكثافات متفاوتة . القيمة النهائية للوزن النوعي بعدد التصحيح الحراري هي 2.769 ، مما يشير الى أن التربة التي تم تحليلها هي تربة ناعمة طبيعية الى حد كبير وجود قيم مختلفة بين العينات قد تشير الى وجود تباين في تركيب المعادن في العينات المختلفة و النتائج تشير الى انها تربة طينية مع احتمالية وجود بعض المعادن الثقيلة .

**3.3 اختبار حد السيولة و اللدونة للتربة الناعمة** : كانت قيمة حد السيولة للتربة الناعمة 23.75% و قيمة حد اللدونة للتربة الناعمة 17.42% و مؤشر اللدونة 6.33% ، حسب التصنيف الموحد يتم التصنيف التربة على انها تربة ناعمة متكونة من طين منخفض اللدونة و طمي منخفض اللدونة ( L-ML ) .

**4.3 حيود الأشعة السينية ( XRD ) :** من المخطط الموضح في ( شكل 4 ) يمكن معرفة أسماء المركبات الكيميائية الموجودة في عينة التربة الناعمة و ذلك موضح في ( جدول 3 ).

**جدول 3. نتائج التحليل الكمي بالأشعة السينية**

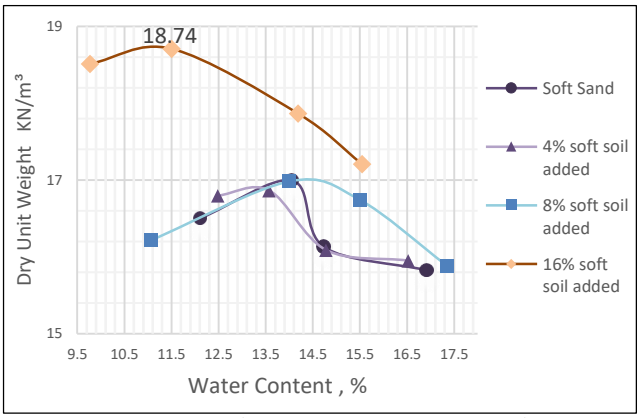
| Mineral Name | Compound Name | Chemical Formula | Semi Quantitative % |
|---|---|---|---|
| Quartez | Silicon Oxide | Si O2 | 67 |
| Microcline | Potassium Aluminum Silicate | K ( Al Si3 O8 ) | 18 |




**شكل 4. مخطط حيود الأشعة السينية ( XRD pattern )**

من خلال تحليل النتائج الكيميائية للطمي باستخدام الاشعة السينية التي أوضحت وجود الكوارتز (SiO2) بنسبة 67% و الميكروكلين (K ( Al Si3 O8)) بنسبة 18% . الكوارتز هو احد المعادن الأكثر شيوعًا في التربة الرملية و الطمي و الطين ، حيث انه يتميز بصلابة عالية مما يعني وجود نسبة كبيرة منه يزيد من مقاومتها للتآكل و القص ، وجود نسبة عالية من الكوارتز يعزز من زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة [6]، مما يزيد من مقاومتها للقص و يجعلها مناسبة للأساسات التي تتطلب تحملًا عاليًا للقص . الميكروكلين هو أحد معادن الفلدسبار و له و له تأثير مختلف عن الكوارتز على الخصائص الهندسية للتربة ، الفلدسبار بشكل عام يمكن أن يعزز التماسك في التربة[6]. الميكروكلين، بفضل تركيبته الكيميائية المعقدة، يمكن أن يساعد في زيادة قدرة التربة على مقاومة التشقق والانهيار تحت الضغط، هذا يشير إلى أن الطمي يحتوي على تماسك نسبي يعزز من قوته الهندسية. استنادًا إلى وجود الميكروكلين، الذي يمكن أن يعزز التماسك، والكوارتز الذي يزيد من زاوية الاحتكاك الداخلي، يمكننا التوقع أن التربة ستكون ذات مقاومة جيدة للقص وقوة تحمل معقولة للأساسات. الكوارتز يوفر صلابة، بينما الميكروكلين يوفر تماسكًا معقولًا.

**5.3 اختبار الدمك ( بروكتور القياسي ) :** في هذا الاختبار يعتمد على المواصفة القياسية الامريكية( ASTM D-698 ) لتحديد العلاقة بين وجدة الوزن الجافة و نسبة الرطوبة للتربة بدون إضافات و التربة بالإضافات قد تشكلت منحنيات تمثل وحدة الوزن الجافة للتربة بجميع نسب إضافة التربة الناعمة و الذي موضحة في ( شكل 5 ) .




**شكل 5. مقارنة بين منحنيات وحدة الوزن الجافة لجميع العينات بجميع نسب إضافة التربة الناعمة**

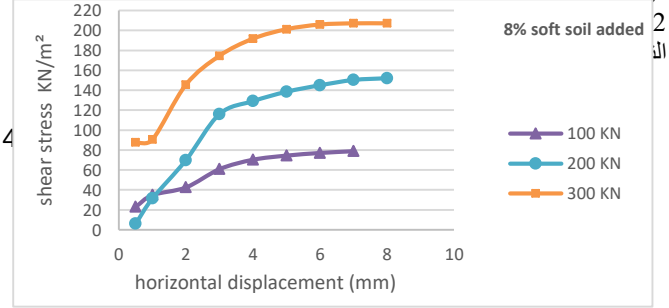
سجلت عينة التربة الرملية المضاف اليها 16% تربة ناعمة أعلى قيمة وحدة الوزن الجافة حيث بلغت قيمتها 18.74 KN/m³ ، عند محتوى مائي 11.2% ، بينما سجلت بقية العينات قيمًا اقل لوحدة الوزن الجافة. قيمة وحدة الوزن الجافة للتربة الرملية بدون إضافات 17 KN/m³ ، سجلت قيمة وحدة الوزن الجافة للتربة المضاف اليها 8% تربة ناعمة نفس قيمة وزن وحدة الحجوم للتربة الرملية بدون إضافات ، قيمة وحدة الوزن الجافة للتربة مضاف اليها 16% تربة ناعمة هي 18.74 KN/m³ ، لذا ، بناءً على النتائج السابقة تبين ان قيمة وحدة الوزن الجافة هي عند إضافة 16% تربة ناعمة بقيمة 18.74 KN/m³ ، يليها الرمل بدون إضافات و إضافة 8% تربة ناعمة حيث كانت القيمة 17 KN/m³ .

**6.3 اختبار القص المباشر :** تم اجراء الاختبار وفقاً للمواصفات الامريكية ( ASTM D3080-03 ) لتحديد معاملات القص و هما زاوية الاحتكاك الداخلي و التماسك للتربة بدون إضافات و التربة بالإضافات . و كما هو موضح في ( جدول 6 ) قيمة زاوية الاحتكاك للتربة بدون إضافات كانت 34° و عند إضافة 4% من التربة الناعمة زادت قيمة زاوية الاحتكاك بنسبة 2.94% و أصبحت 35° ، و عند إضافة 8% قلت زاوية الاحتكاك وصلت الى 32° ، ولوحظ عند إضافة 16% تربة ناعمة ارتفاع قيمة زاوية الاحتكاك أصبحت مساوية للتربة بدون إضافات ، وكانت قيمة زاوية الاحتكاك في التربة الناعمة 28° .

**جدول 6. نتائج قيم زاوية الاحتكاك الداخلي في عينات النسب الثلاث المضافة و التربة الرملية بدون إضافات و التربة الناعمة .**

| Added percentage of soft soil (%) | 0 | 4 | 8 | 16 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Friction Angle (°) | 34 | 35 | 32 | 34 | 28 |

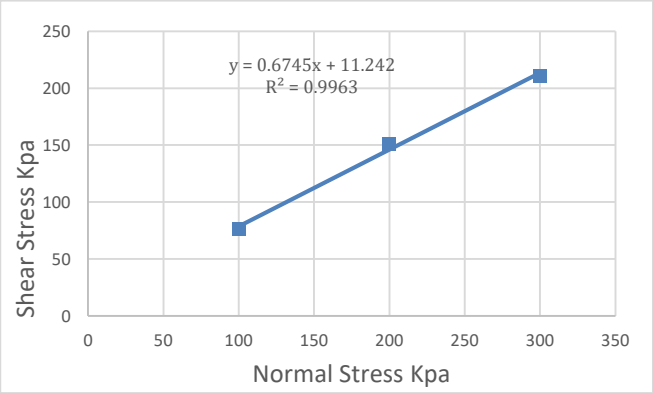
اما تماسك التربة و كما موضح في ( جدول 7 ) ، كانت قيمة التماسك للتربة بدون الإضافات 11.242 Kpa و عند إضافة 4% تربة ناعمة أصبحت 4.22 Kpa ، وبإضافة 8% تربة ناعمة زادت قيمة التماسك بنسبة 59.67% مقارنة بالتربة الاصلية لتصل قيمة التماسك الى 17.947 Kpa ، و عند إضافة 16% من التربة الناعمة كانت قيمة التماسك 37.867 Kpa حيث زادت بنسبة




**جدول 7. نتائج قيم التماسك في عينات النسب الثلاث المضافة و التربة الرملية بدون إضافات و التربة الناعمة .**

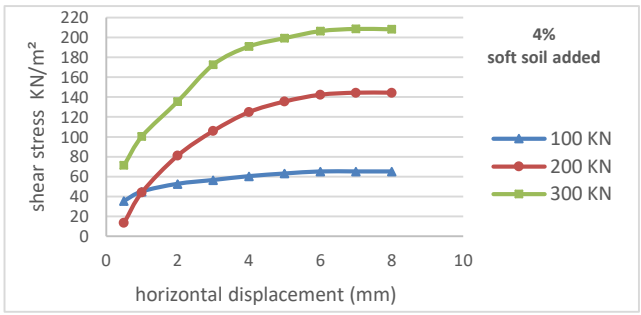
| Added percentage of soft soil (%) | 0 | 4 | 8 | 16 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Friction Angle (Kpa) | 11.2 | 4.2 | 17.9 | 37.8 | 58.1 |

بينت العلاقة بين الاجهاد العمودي و اجهاد القص كما موضح في ( شكل 6 ) أن النقاط التجريبية تتوزع بشكل جيد على خط مستقيم ، مما يدل على سلوك خطي للعينة . و باستخدام ميل هذا الخط ، يمكن حساب زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة ، في حين يمكن تقدير قيمة التماسك من نقطة تقاطع هذا الخط مع محور إجهاد القص عندما يكون الإجهاد العمودي صفراً .




**شكل 6. منحنى العلاقة بين الاجهاد العمودي و اجهاد القص للتربة بدون إضافات**

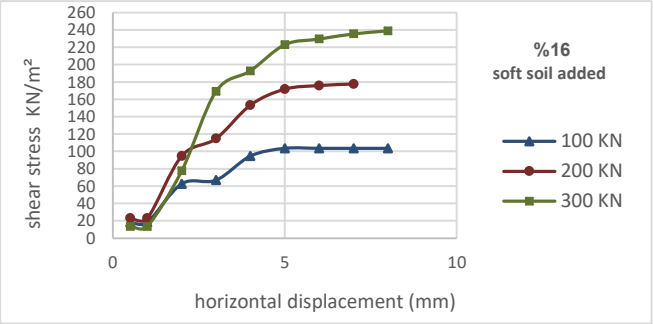
كذلك العلاقة بين الازاحة الافقية و اجهاد القص بشكل عام يزداد اجهاد القص مع الازاحة الافقية حتى يصل الى اقصى قيمة لإجهاد القص بعدها يبدأ المنحنى في التناقص . حيث أظهرت النتائج وجود علاقة طردية بين نسبة التربة الناعمة المضافة إلى التربة الرملية وقيمة إجهاد القص عند الوصول إلى مرحلة التشوه اللدن كما موضح في ( شكل 7، 8 ، 9 ) . فعند تحميل العينات بقوة ثابتة مقدارها 100 KN، لوحظ أن العينة التي تحتوي على 4% من التربة الناعمة وصلت إلى التشوه اللدن عند إجهاد قص يقارب 63 KN/m². ومع زيادة نسبة التربة الناعمة إلى 8%، ارتفعت قيمة إجهاد القص عند التشوه اللدن إلى حوالي 79 KN/m². وعند إضافة 16% من التربة الناعمة، وصلت قيمة إجهاد القص إلى نحو 105 KN/m² قبل حدوث التشوه اللدن. تشير هذه النتائج إلى أن زيادة نسبة التربة الناعمة تؤدي إلى تحسين مقاومة التربة للقص وتأخير حدوث التشوهات اللدنة، مما يعزز من أداء التربة تحت الأحمال المختلفة.




**شكل7. منحنى العلاقة بين الإزاحة الافقية و إجهاد القص للعينة 4% تربة ناعمة**

DOI:10.5281/zenodo.17778740

**شكل 8. منحنى العلاقة بين الإزاحة الافقية و إجهاد القص للعينة 8% تربة ناعمة**




**شكل 9. منحنى العلاقة بين الإزاحة الافقية و إجهاد القص للعينة 16% تربة ناعمة**

**4. الاستنتاجات :**

بناءً على إضافة التربة الناعمة إلى التربة الرملية ، يمكننا استخلاص بعض الاستنتاجات والتوصيات ذات الصلة بتطبيقات التربة المختلطة في الهندسة المدنية والجيوتقنية.

وحدة الوزن الجافة ظلت تقريبًا ثابتًا عند إضافة 4% و8% من التربة الناعمة، مما يشير إلى أن هذه النسب الصغيرة لا تؤثر بشكل كبير على كثافة التربة. لكن عند 16% من التربة الناعمة، لوحظ ارتفاع واضح إلى 18.74 KN/m³، مما يشير إلى أن التربة الناعمة تزيد من كثافة التربة بشكل ملحوظ مع ارتفاع النسبة.

زاوية الاحتكاك للرمل 34 درجة، وارتفعت قليلاً إلى 35° مع إضافة 4% من التربة الناعمة، ما يعني أن كمية صغيرة من التربة الناعمة يمكن أن تعزز زاوية الاحتكاك، وعند إضافة 8%، انخفضت زاوية الاحتكاك إلى 32°، ثم ارتفعت مجددًا إلى 34° عند 16%. هذا يشير إلى أن زيادة التربة الناعمة إلى نسبة معينة (حوالي 16%) يمكن أن يعيد تحسين زاوية الاحتكاك، ولكن تأثيره غير منتظم عند النسب المتوسطة.

أظهرت النتائج زيادة ملحوظة في التماسك مع ارتفاع نسبة التربة الناعمة، حيث ارتفع التماسك من 11.242 Kpa للرمل إلى 37.867 Kpa عند 16% من التربة الناعمة، مما يشير إلى أن الطمي يساهم بشكل كبير في زيادة تماسك التربة . يعتبر هذا مفيدًا جدًا عند استخدام التربة كطبقة تحتية للبناء أو الردميات في المناطق التي تحتاج إلى مقاومة جيدة للتشوهات.

احتواء التربة على نسب معينة من الكلوريدات (0.4118) والكبريتات (0.2395) قد يكون مؤثرًا في البيئات الرطبة أو المالحة، حيث يمكن أن تتفاعل الكلوريدات والكبريتات مع الخرسانة أو الأساسات المعدنية مسببة التآكل. قيمة الأس الهيدروجيني (pH = 6.75) تعني أن التربة حمضية قليلاً، وهو ما قد يتطلب معالجة إضافية إذا تم استخدامها في تطبيقات تتطلب استقرارًا كيميائيًا طويل الأمد.

أظهرت نتائج XRD أن التربة تحتوي على نسبة عالية من الكوارتز (67%)، مما يعزز من قوة التربة وثباتها، ويجعلها مقاومة للتآكل، وجود الميكروكلين بنسبة 18% يشير إلى أن التربة تحتوي على بعض الخصائص التي قد تمنحها استقرارًا إضافيًا عند الاستخدام في التطبيقات الهندسية.

**5. التوصيات :**

• يوصى باستخدام نسبة لا تقل عن 10% نظرًا للتأثير المحدود على الخواص الهندسية .

• نظرًا لأن الرمل المستخدم سيء التدرج ويحتوي على طمي و طين ، يوصى بإضافة مواد حبيبية إضافية لتحسين التدرج وزيادة استقرار الخليط، مما يقلل من اعتماده على التربة الناعمة وحدها لتحقيق الخصائص المطلوبة.

• نظرًا لنسبة الكوارتز المرتفعة التي تضيف مقاومة ميكانيكية جيدة، يوصى بإجراء تجارب إضافية لتقييم مقاومة التربة للتآكل في البيئة المحيطة، خصوصًا في حالة وجود مياه جوفية مالحة أو بيئات رطبة.

• يُوصى باستخدام الخليط المحسن بالتربة الناعمة في طبقات التأسيس أو الردميات في مشاريع البناء حيث إن الكثافة العالية والتماسك المرتفع يجعلان الخليط مناسبًا لتحمل الأحمال وتقليل التشوهات تحت الأحمال الديناميكية.

• يوصى بإجراء اختبارات إضافية على نسب مختلفة بين 10% و 40% لمعرفة تأثيرها بشكل أدق حيث قد تكشف هذه الدراسات عن نسبة مثلى أخرى لتحقيق توازن بين التماسك وزاوية الاحتكاك.

المراجع – References

[1] Braja M. Das, Khaled Sobhan, Dean Emeritus, "Principles of Geotechnical Engineering ", 8TH EDITION, USA.

[2] Khdair, Adnan I., Sawsan I. Khdair, and Ghaida A. Abu-Rumman. "Dataset on some soil properties improvement by the addition of olive pomace." Data in brief 24 (2019): 103878..

[3] Norsyahariati, Nik Daud Nik, and Kam Ru Hui. "The effect of soil particle arrangement on shear strength behavior of silty sand." MATEC Web of Conferences. Vol. 47. EDP Sciences, 2016.

[4] Jinbu Li, Hao Geng, Guorong Zhang, Guangri Jin, "Influence of silt content on shear strength of sandy soil", IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2021.

[5] Moayed, R. Ziaie, E. Khavaninzadeh, and M. Ghorbani Tochaee. "Effect of silt presence on shear strength parameters of unsaturated sandy soils." Int J Geotech Geol Eng 13.6 (2019): 439-442.

[6] Raphl E. Grim, "Clay Mineralogy", McGraw-Hill Book Company, Inc, 1953.