

Geotechnical Improvement of Subgrade Soil Using Quicklime

Dr. Majd Al Mahmoud*

Dr. Dalia Awlad *

(Received 11 / 5 / 2026. Accepted 23 / 7 / 2026)

□ ABSTRACT □

This research investigates the effect of quicklime addition on improving the geotechnical properties of clayey soil collected from the Al-Haffah area in Latakia Governorate and evaluates its suitability for road subgrade applications. Soil samples were treated with different quicklime contents of 4%, 6%, 9%, and 12% by dry soil weight and cured for 7, 14, and 28 days. Laboratory tests included Atterberg limits, Standard Proctor compaction, unconfined compressive strength (UCS), direct shear, and California Bearing Ratio (CBR) tests.

The results showed a significant reduction in the plasticity index with increasing lime content, indicating improved soil workability. In addition, UCS and CBR values increased, reflecting enhanced soil strength and bearing capacity. The optimum moisture content increased, while the maximum dry density decreased after stabilization. Shear strength characteristics also improved with lime treatment.

The findings confirm that quicklime is an effective and economical stabilizing agent for clayey soils in coastal regions, reducing the need for soil replacement and supporting sustainable road construction through the use of local materials.

Keywords: Subgrade Soil Improvement, Quicklime, Plasticity Index, California Bearing Ratio (CBR), Unconfined Compressive Strength (UCS), Sustainable Development.



Copyright :Latakia University journal (formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Al-Wataniya Private University, Hama, Syria. majd.almahmoud@wpu.edu.sy

**Assistant Professor, Department of Transportation Engineering, Faculty of Civil Engineering, Al-Wataniya Private University, Hama, Syria. Dalia-awlad@wpu.edu.sy

تحسين الخصائص الجيوتكنيكية لتربة الطابق الترابي باستخدام الكلس الحي

د. مجد المحمود *

د. داليا أولاد **

(تاريخ الإيداع 11 / 5 / 2026. قُبِلَ للنشر في 23 / 7 / 2026)

□ ملخص □

يهدف البحث إلى دراسة تأثير إضافة الكلس الحي لتحسين الخصائص الجيوتكنيكية لتربة غضارية مأخوذة من منطقة الحفة في محافظة اللاذقية، وذلك بهدف تقييم صلاحيتها للإستخدام في طبقات الطابق الترابي للطرق. تم تحضير عينات التربة بإضافة نسب مختلفة من الكلس الحي بلغت % (4,6,9,12) من الوزن الجاف للتربة عند أزمنة معالجة (7,14,28) يوم ، وتم إجراء مجموعة من التجارب المخبرية شملت حدود أتربرغ، بروكتور النظامي، مقاومة الضغط غير المطوّق (UCS)، اختبار القص المباشر، و نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR) .

بيّنت النتائج انخفاضاً ملحوظاً في قيم دليل لدونة التربة مع زيادة نسبة الكلس المضاف، مما يدل على تحسن قابلية تشغيل التربة. كما لوحظ ارتفاع في مقاومة الضغط غير المطوّق وقيم CBR ، الأمر الذي يعكس زيادة في مقاومة التربة وقدرتها على التحمل. كما لوحظ زيادة في نسبة الرطوبة المثالية وانخفاض في الكثافة الجافة العظمى، بالإضافة إلى تحسّن في مواصفات القص.

أظهرت النتائج إمكانية استخدام الكلس الحي كمادة فعّالة واقتصادية لتحسين الترب الغضارية في المناطق الساحلية المشابهة، من خلال تقليل الحاجة إلى استبدال التربة أو استخدام مواد مستوردة، بما ينسجم مع مبادئ التنمية المستدامة عبر الاعتماد على الموارد المحلية وتحسين كفاءة تنفيذ مشاريع الطرق.

الكلمات المفتاحية: تحسين الطابق الترابي، الكلس الحي، دليل اللدونة، نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR)، الضغط غير المطوّق (UCS)، التنمية المستدامة.



حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر

بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

* مدرس، قسم الهندسة الجيوتكنيكية، كلية الهندسة المدنية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه، سورية.

majd.almahmoud@wpu.edu.sy

** مدرس، قسم الهندسة الجيوتكنيكية، كلية الهندسة المدنية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه، سورية.

Dalia-awlad@wpu.edu.sy

1- مقدمة:

يُعد تثبيت تربة التأسيس (Subgrade) عنصراً أساسياً في تطوير البنى التحتية للطرق ، خاصةً عند التعامل مع الترب التي تُظهر خصائص هندسية ضعيفة مثل اللدونة العالية، انخفاض قدرة التحمل، قابلية الانتفاخ و ضعف المقاومة. من بين تقنيات التثبيت الكيميائي المختلفة، استُخدم الكلس الحي (أكسيد الكالسيوم CaO) لعقود طويلة كحل فعال واقتصادي لتحسين خصائص تربة التأسيس [1-3].

يتضمن تثبيت التربة بالكلس الحي خلط الكلس المطحون مع التربة، حيث يتفاعل مع رطوبة التربة مكوناً هيدروكسيد الكالسيوم $(Ca(OH)_2)$ ، مع إطلاق كمية كبيرة من الحرارة وبدء سلسلة من التحولات الكيميائية والفيزيائية. تؤدي هذه التفاعلات إلى تغيير جوهري في التركيب الفلزي والبنية المجهرية والسلوك الهندسي للتربة، مما يجعلها مناسبة للاستخدام كأساس مستقر للطرق والمنشآت الهندسية المدنية الأخرى [4-6].

على الرغم من الانتشار الواسع لتطبيق هذه التقنية منذ خمسينيات القرن الماضي، لا تزال آليات تثبيت التربة بالكلس الحي قيد التطوير والتحسين باستخدام تقنيات تحليل حديثة، كما ازدادت أهمية الاعتبارات البيئية في السنوات الأخيرة [7-9]. الدراسة العلمية المنهجية لهذه التقنية بدأت فعلياً في منتصف القرن العشرين مع توسع مشاريع البنية التحتية للطرق. فقد بين كل من Brand و Schoenberg عام 1959 أن إضافة 3% من الكلس الحي (وزنياً) إلى تربة اللوس أدت إلى تحسن كبير في سير أعمال الإنشاء وجودة التربة، مما أتاح استمرار العمل خلال الفترات الممطرة التي كان العمل فيها يتوقف عادةً. وقد أسهم هذا العمل المبكر في إثبات الجدوى العملية لاستخدام الكلس الحي في إنشاء الطرق [10].

يعتمد الأساس النظري لتثبيت التربة بالكلس على فهم تفاعلات التربة-الكلس على عدة مستويات. فعند إضافة الكلس الحي إلى تربة رطبة، يحدث تفاعل إماهة طارد للحرارة يحول CaO إلى $Ca(OH)_2$ ويرفع قيمة (pH) لنظام التربة-الماء إلى حوالي 12.4 [11,12]. تؤدي هذه البيئة القلوية العالية إلى إحداث تغييرات فيزيوكيميائية فورية في فلزات الغضار، تليها تفاعلات بوزولانية أبطأ تُسهم في تطوير المقاومة على المدى الطويل [13,14]. ان فعالية تثبيت التربة بالكلس الحي تعتمد على عدة عوامل: منها نوع التربة وتركيبها الفلزي، محتوى الرطوبة، نسبة الكلس المضافة، ظروف المعالجة وطاقة الرص [15-17]. تُظهر الترب ناعمة الحبات ذات المحتوى الغضاري خاصة تلك التي تحتوي على ألومينوسيليكا تفاعلية أفضل استجابة للمعالجة بالكلس [18,19]. كما تُعد الترب الغضارية الانتفاخية، التي تمثل تحدياً كبيراً في إنشاء الطرق بسبب قابليتها العالية للانتفاخ، من أكثر الترب قابليةً للتحسين باستخدام الكلس الحي [12,20].

أظهرت الدراسات تحسناً كبيراً في مقاومة الضغط غير المطوّق (UCS) بعد المعالجة بالكلس، حيث يمكن أن تزيد المقاومة عدة أضعاف [1,3] كما تتحسن خصائص التحمل والصلابة [8,12]، كذلك يؤدي الكلس إلى خفض اللدونة بشكل ملحوظ عبر تقليل حد السيولة وزيادة حد اللدونة نتيجة التبادل الأيوني والتلبد مما يحسن من قابلية التشغيل [4, 21]. كما تتحسن قدرة التحمل (CBR) بشكل كبير مع تقليل الانتفاخ وتحويل الترب الضعيفة إلى مواد مناسبة للطرق [9,20] وتحسن قابلية التنفيذ نتيجة تغير البنية الحبيبية وزيادة التماسك [22].

تبدأ آليات التثبيت فوراً بتفاعلات التبادل الأيوني والتلبد التي تقلل قوى التناثر بين الجزيئات [4,13] تليها تفاعلات بوزولانية تُنتج مركبات إسمنتية مسؤولة عن المقاومة طويلة الأمد [1,14,15]، كما تلعب الكرينة دوراً إضافياً في زيادة المقاومة واحتجاز الكربون [2,5,13].

على المستوى المجهرى تؤدي هذه التفاعلات إلى تكوين بنية متماسكة ثلاثية الأبعاد تقلل المسامية وتزيد الصلابة وقد أثبتت الدراسات فعالية الكلس في تحسين أنواع متعددة من الترب مثل الترب الانتفاخية، اللوس، اللاتيريت، الغضاريات الرخوة، الرسوبيات البحرية وحتى المخلفات الصناعية [1,4,9,19,21].

2- أهمية البحث وأهدافه:

يعتبر الحجر الكلسي من أكثر الصخور الرسوبية انتشاراً في سوريا، إذ يشكل الأساس في البيئات البحرية الضحلة التي غمرت المنطقة خلال حقبة الميزوزويك ولا سيما الترياسي الجوراسي والطباشيري. تتواجد تشكيلات الحجر الكلسي ضمن توضعات الأيوسين الأوسط والأعلى والأوليغوسين وأحياناً ضمن توضعات النيوجين وأفضل الأنواع هي المتواجدة ضمن توضعات الأيوسين الأعلى حيث تصل نسبة الكربونات فيها حوالي 99 % وهي تتكشف في المنطقة الجنوبية و الوسطى و الشمالية والساحلية ويقدر الاحتياطي الجيولوجي لتشكيلات الحجر الكلسي المكتشفة بحوالي 12 مليار م³ [23].

تتبع أهمية هذا البحث من الحاجة إلى تحسين خواص الترب المحلية باستخدام الكلس الحي كأحد الحلول العملية والاقتصادية لرفع كفاءتها كطبقة تأسيس في المشاريع الطرقية. يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير إضافة نسب مختلفة من الكلس الحي على لدونة التربة وقيم CBR ومقاومة الضغط غير المطوق، بالإضافة إلى تحديد الرطوبة المثلى والكثافة الجافة الأعظمية. كما يتناول البحث تأثير مدة المعالجة (7، 14، 28) يوماً، بهدف تحديد النسبة المثلى من الكلس وزمن المعالجة الأنسب لتحقيق أفضل أداء هندسي للتربة المعالجة.

3- طرائق البحث ومواده:

3.1. منطقة الدراسة

تقع منطقة الحفة في محافظة اللاذقية شمال غرب سوريا، ضمن بيئة جغرافية تتسم بتضاريس جبلية ومناخ متوسطي رطب نسبياً، حيث تتأثر التربة بشكل واضح بالتغيرات الموسمية في درجات الحرارة والهطولات المطرية. وتنتشر في هذه المنطقة الترب الغضارية التي تُعرف بخصائصها الهندسية المعقدة، مثل ضعف المقاومة، وارتفاع اللدونة، وحساسيتها لتغيرات المحتوى المائي، مما يؤثر على أدائها كطبقة تأسيس في المشاريع الإنشائية والطرقية. وقد تم اختيار منطقة الحفة كمجال للدراسة نظراً لكونها تمثل نموذجاً واقعياً للترب الغضارية في المناطق الساحلية السورية، إضافة إلى أهميتها في مشاريع البنية التحتية. وتأتي هذه الدراسة بهدف فهم خصائص هذه التربة وتحسينها باستخدام الكلس الحي، بما يسهم في تقديم حلول هندسية عملية قابلة للتطبيق في الظروف المحلية.

3.2. التربة :

أخذت عينات التربة المراد تحسينها من منطقة الحفة في محافظة اللاذقية من عمق 1.5 m تحت سطح الأرض، ونقلت إلى مخبر ميكانيك التربة التابع لمديرية الخدمات الفنية ضمن أكياس محكمة الإغلاق للحفاظ على رطوبتها الطبيعية، تم اجراء التجارب المخبرية لتحديد خواص التربة الفيزيائية والميكانيكية وفق نظام ASTM ويبين الجدول 1 نتائج هذه التجارب:

جدول (1) خواص التربة المختبرة

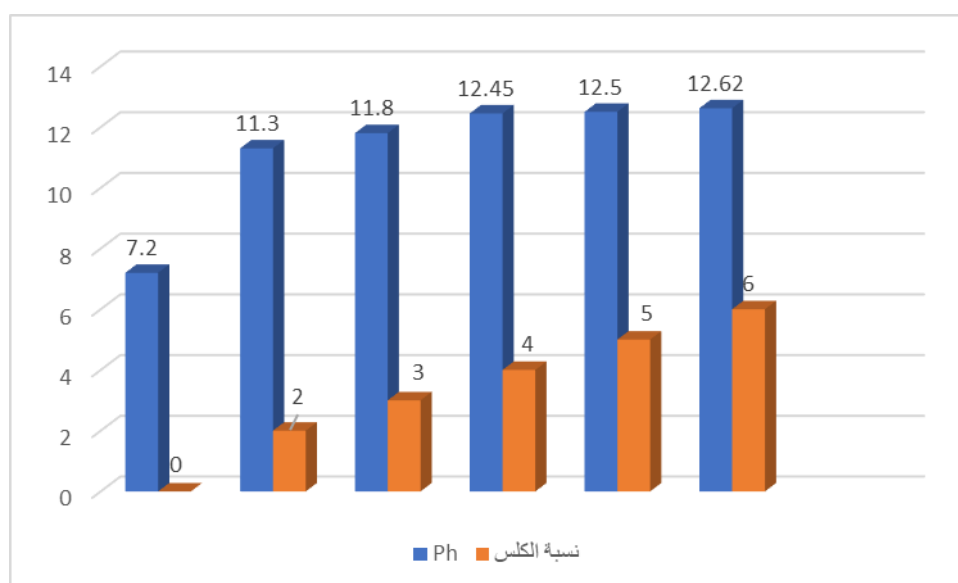
ASTM	الوحدة	القيمة	خواص التربة
ASTM D854-14	-	2.72	الوزن النوعي
ASTM D2216-19	%	18.2	الرطوبة الطبيعية
ASTM D4318-17	%	68	LL
ASTM D4318-17	%	30	PL
ASTM D4318-17	%	38	PI
ASTM D6913-04	%	10	sand
ASTM D7928-21	%	35	silt
ASTM D7928-21	%	55	clay
ASTM D698-12	%	19.5	الرطوبة المثالية
ASTM D698-12	kN/m ³	16.8	الكثافة الجافة الأعظمية
ASTM D2166-16	kPa	120	مقاومة الضغط غير المطوق
AASHTO T 193	%	2.1	CBR
ASTM D3080-11	kPa	30	C التماسك
ASTM D3080-11	درجة	13	Φ زاوية الاحتكاك
ASTM D2487-17	CH	USCS	
AASHTO M 145	A-7-6	AASHTO	

3.3.3. الكلس :

يبين الجدول (2) نتائج تجارب التحليل الكيميائي الذي تم في مخابر كلية العلوم بجامعة حمص للكلس الحي المستخدم في البحث والذي تم احضاره من محافظة حماه بشكل كتل تم شيها في الفرن. وفقاً للمواصفة [24] فإن الحد الأدنى الذي يضمن استمرار التفاعلات البوزلانية هو الوصول إلى درجة حموضة (pH) لا تقل عن 12.4، ويشار إلى هذه النقطة باسم نقطة التثبيت بالكلس Lime Fixation Point بناء على هذا المعيار تم اضافة الكلس بنسب مختلفة وقياس درجة الحموضة عند درجة حرارة 25 c⁰ لمعرفة النسبة الأقل من الكلس التي سيتم اعتمادها في البرنامج التجريبي والتي تعكس هذا الشرط، وبين الشكل رقم 1 نتائج تجربة pH .

الجدول رقم (2): نتائج التحليل الكيميائي للكلس المستخدم في البحث

النسبة المئوية %	التركيب الكيميائي
91	CaO
2	MgO
1.3	SiO ₂
0.7	Al ₂ O ₃
5	الفاقد بالحرق
2.3	الوزن النوعي



الشكل (1) تحديد نسبة الكلس الأولية

بنتيجة التجربة تبين ان 4% هي النسبة الدنيا التي تحقق درجة pH أعلى من 12.4

3.4. منهجية اجراء التجارب:

تم تنفيذ التجارب المخبرية على التربة الغضارية المرجعية المحسنة باستخدام نسب الكلس (4،6،9،12)% وذلك عند أزمنة معالجة (7،14،28) يوماً كما هو مبين في الجدول 3 . لتنفيذ تجارب القص والضغط غير المطوق و CBR تم اعتماد العينات المشكلة وفق تجربة بروكتور النظامية (ASTM D698-12) و نسبة الرطوبة المثالية والكثافة الجافة الأعظمية المحددة عند كل نسبة من الكلس المضاف والمبينة في الجدول 4، حيث تم حفظ العينات ضمن أكياس محكمة الاغلاق ضمن مدة المعالجة وبالنسبة لعينات ال CBR تم حفظها منقوعة بالماء.

الجدول (3) برنامج اجراء التجارب المخبرية

الكلس %	التربة المرجعية %	زمن المعالجة (يوم)
4	96	7
4	96	14
4	96	28
6	94	7
6	94	14
6	94	28
9	91	7
9	91	14
9	91	28
12	88	7
12	88	14
12	88	28

الجدول (4) نتائج تجربة بروتور النظامية

نسبة الكلس %	الرطوبة المثالية (OWC)%	الكثافة الجافة الأعظمية (MDD) KN/m ³
4	21	16.6
6	22.2	16.5
9	23.8	16.3
12	24.5	16.3

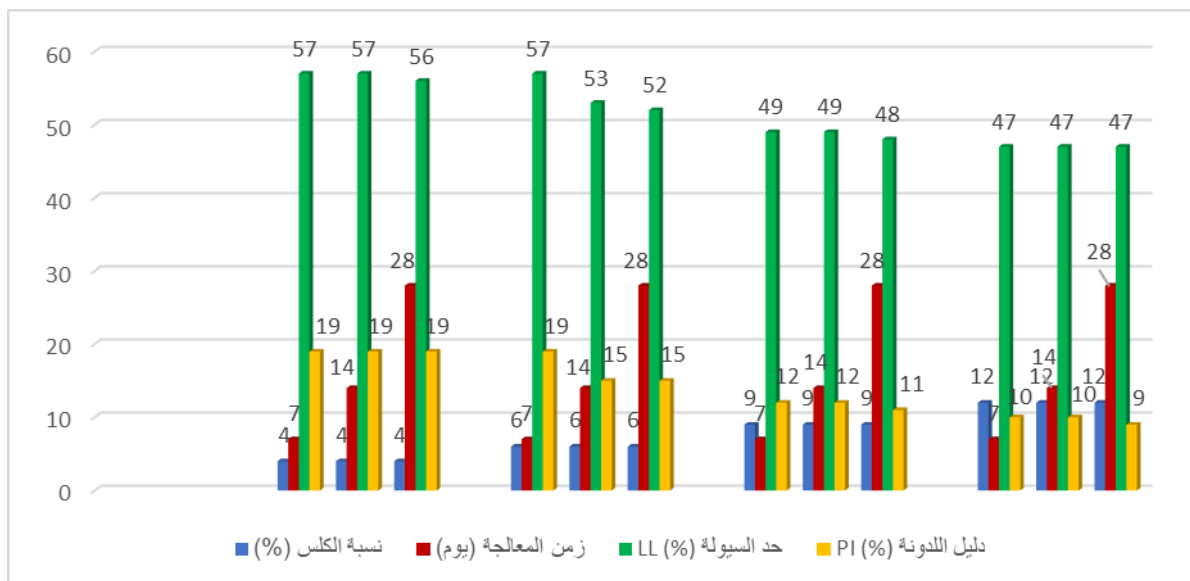
4- النتائج والمناقشة:

4.1. تجارب حدود أتربرغ:

أظهرت نتائج إضافة 4% من الكلس انخفاض دليل اللدونة بمقدار 50 % مقارنة بالتربة الأصلية غير المعالجة وذلك يعود الى التبادل الشاردي بين شوارد الكالسيوم (Ca^{+2}) وشوارد الصوديوم/البوتاسيوم على سطح الغضار الأمر الذي يؤدي إلى تقليل سماكة الغشاء المائي المزدوج (Double Layer) المحيط بحبات الغضار مما يقلل من قابلية امتصاص الماء وبالتالي يخفض LL و PI. وعند زيادة نسبة الكلس المضاف الى 6% انخفض دليل اللدونة بمقدار 60.52% عند زمن معالجة 28 يوماً لأنه مع ازدياد كمية الكلس تزداد وتيرة عمليات تكتل حبيبات الغضار الدقيقة لتشكيل كتل أكبر و هذه البنية الجديدة أقل قدرة على الاحتفاظ بالماء بين وريقات الغضار، أما عند نسبة كلس مضاف 9% انخفض دليل اللدونة بمقدار 71% عند زمن 28 يوماً ، عند هذه النسبة يبدو أن نظام التربة تشبع بشوارد الكالسيوم مما يؤدي إلى أقصى درجة ممكنة من التكتل و يصبح الانخفاض الإضافي في LL و PI مع الزمن ضئيلاً، الأمر الذي يشير إلى اكتمال التفاعلات الكيميائية المسؤولة عن تعديل الخصائص الفيزيائية للتربة ، الأمر الذي يفسر التناقص الضئيل بقيم اللدونة والسيولة عند نسبة كلس مضافة 12% مقارنة بنسبة 9% .

يبين الشكل 2 نتائج تجارب اللدونة عند نسب الكلس المضافة وأزمنة المعالجة المختلفة.

تتوافق هذه النتائج مع ماتوصل اليه Al-Mukhtar وزملاؤه الذين قاموا بمعالجة التربة الغضارية بنسب كلس (1,4,10)% عند أزمنة (7,90) يوماً، حيث تناقصت قيمة دليل اللدونة مع ازدياد نسبة الكلس وزمن المعالجة من 70 للتربة غير المعالجة الى 4 عند نسبة 10% كلس بعد 7 ايام و 2 بعد 90 يوماً [27] .



الشكل (2) نتائج تجارب حدود أتريرغ

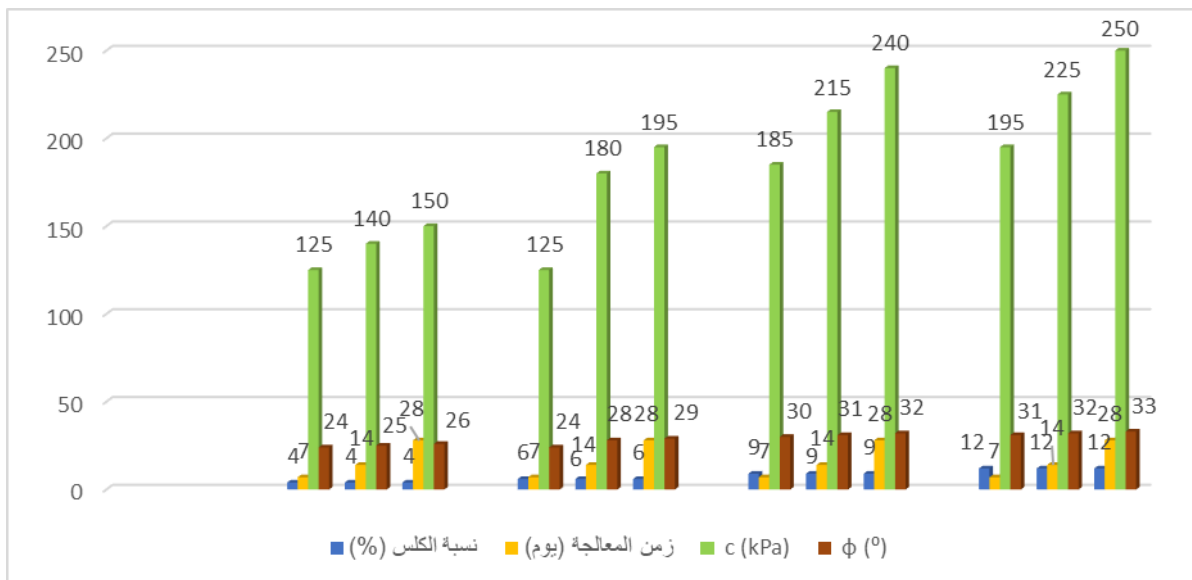
4.2. تجارب القص:

يوضح الشكل 3 تزايد قيم التماسك C وزاوية الاحتكاك Φ مع زيادة نسبة الكلس وزمن المعالجة. يعزى ارتفاع التماسك بشكل رئيس إلى التفاعلات البوزولانية طويلة الأمد بحيث تشكل مركبات مثل سيليكات الكالسيوم المائية روابط كيميائية قوية ومستمرة بين حبيبات التربة، تعمل كغراء كيميائي. أما زيادة زاوية الاحتكاك فتعكس تحول البنية الدقيقة للتربة من بنية مشتتة إلى بنية متكتلة الأمر الذي يخلق حبيبات أكبر وأكثر خشونة تزيد مقاومتها للانزلاق النسبي بينها تحت تأثير الإجهاد. بين Almuaythir وزملاؤه تحسن مواصفات القص للتربة الغضارية المعالجة بالكلس بازدياد نسبة الكلس المضاف وبازدياد زمن المعالجة، حيث قاموا بتحسين التربة الغضارية باستخدام نسب كلس (3,6,9) عند أزمنة معالجة (1,7,14,30) يوماً، ازدادت قيمة زاوية الاحتكاك الداخلي من 31° للتربة غير المعالجة إلى 31.62° عند نسبة 9% كلس بعد 30 يوم، وازدادت قيمة التماسك من (130 kPa) للتربة الأصلية إلى (161 kPa) عند نسبة 9% كلس بعد 30 يوم [28].

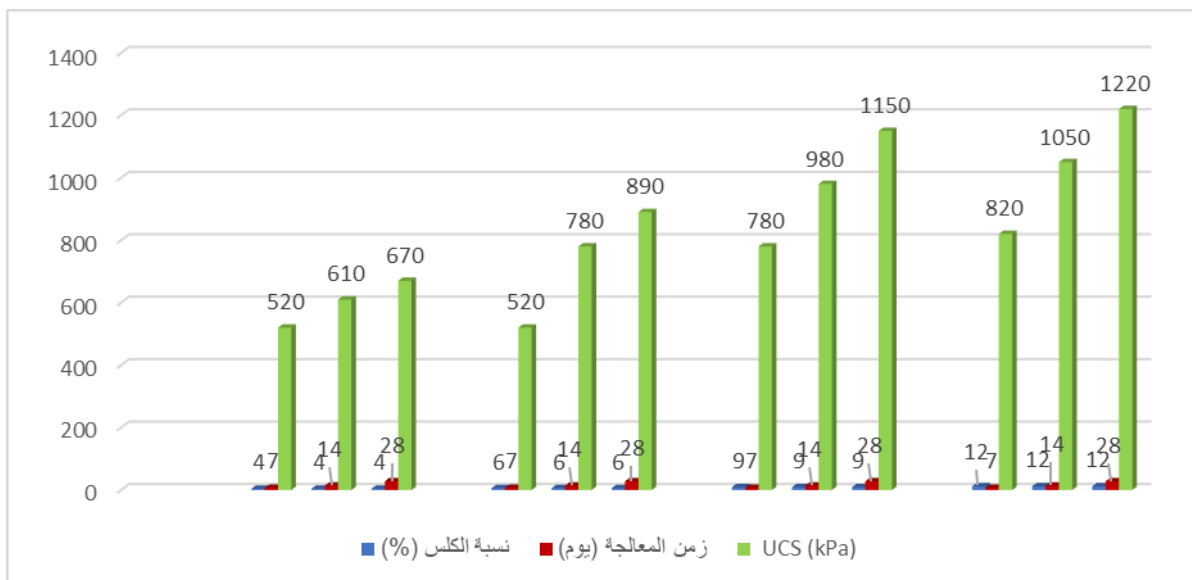
4.3. تجارب الضغط غير المطوّق UCS:

يبين الشكل 4 تطوراً ملحوظاً في قيم الضغط غير المطوّق مع زيادة نسبة الكلس المضاف وزمن المعالجة، حيث ازدادت المقاومة من (120 kPa) للتربة الأصلية بدون إضافة كلس إلى (1220 kPa) عند نسبة كلس مضاف 12% وبعد زمن معالجة 28 يوماً، ويرجع هذا التحسن في المقاومة إلى تطور التفاعلات البوزولانية والمستمرة مع الزمن والتي تؤدي إلى تشكل مصفوفة رابطة من مركبات سيليكات الألمنيوم المائية وألومينات الكالسيوم المائية والتي تعمل كمادة سادة للفراغات ورابطة بين الحبيبات. ويمكن أيضاً ملاحظة الزيادة الهامشية في المقاومة بين نسبة كلس 9% (1150 kPa) ونسبة كلس 12% (1220 kPa) بعد 28 يوم بما يعادل (6%) فقط، ويمكن تفسير ذلك بوصول الوسط إلى حالة اشباع في هذه المرحلة بحيث أصبح سطح الغضار التفاعلي مشبعاً بشوارد

الكالسيوم، وأي زيادة في نسبة الكلس تتحول الى فائض غير متفاعل. درس Al-Mukhtar وزملاؤه تأثير نسبة الكلس المضاف وزمن المعالجة على مقاومة الضغط غير المطوّق للتربة الغضارية المحسّنة بالكلس، حيث ازدادت المقاومة مع ازدياد نسبة الكلس وزمن المعالجة من (300 kPa) للتربة غير المعالجة الى (400,1200,1600 kPa) عند نسب (1,4,10) % كلس على الترتيب بعد 7 ايام والى (400,1800,2400 kPa) بعد 90 يوماً [27].



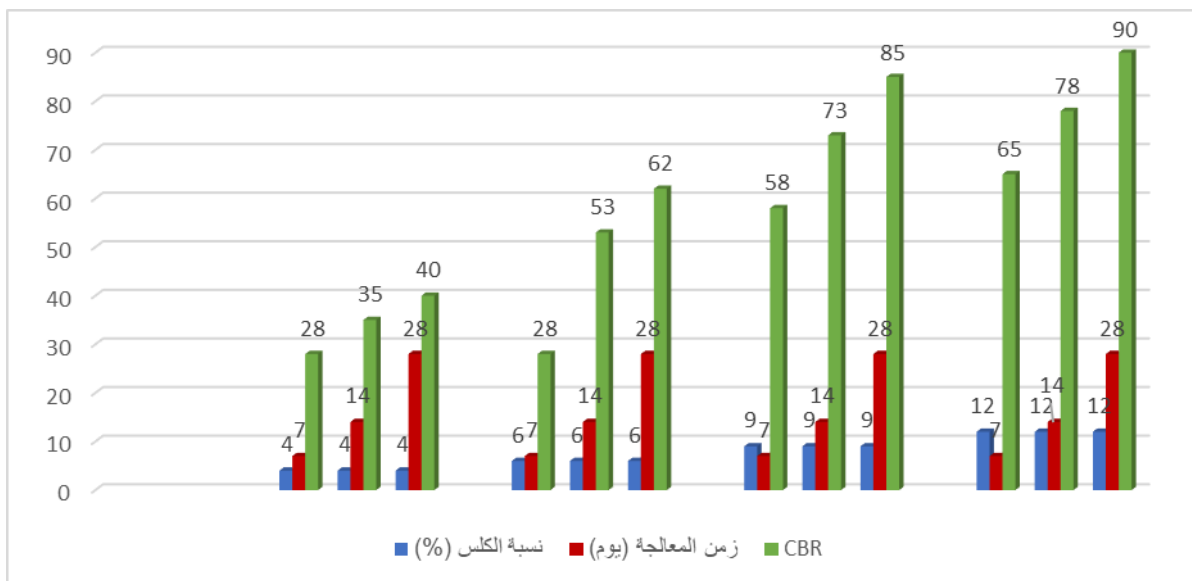
الشكل (3) نتائج تجارب القص



الشكل (4) نتائج تجربة الضغط غير المطوّق

4.4. تجارب نسبة تحمل كاليفورنيا CBR:

أظهرت نتائج تجارب CBR المبينة في الشكل 5 تحسناً كبيراً في قدرة تحمل التربة، حيث ارتفعت القيمة من 2.1% للتربة الأصلية إلى 90% بعد إضافة 12% كلس وزمن معالجة 28 يوم. هذا التحسن الكبير يؤثر إلى تحول جذري في سلوك التربة: من مواد تحت أساس ضعيفة إلى مواد ذات قدرة تحمل عالية تصلح لطبقات الأساس وفق معظم مواصفات الطرق. ويعود السبب إلى أن إضافة الكلس قللت من حساسية التربة للماء وهي أحد العوامل المؤثرة على قيم CBR بالإضافة إلى التفاعلات البوزولانية طويلة الأمد (مع تقدم زمن المعالجة) والتي أدت إلى تكون النواتج الاسمنتية الثانوية (Cementitious Products) مثل سيليكات الكالسيوم المائية والتي عملت على زيادة صلابة كتلة التربة وتقليل الانضغاط وإنشاء روابط قوية بين الحبات الأمر الذي يزيد من قيم CBR. إن نظرة تحليلية على قيم CBR المتزايدة مع تزايد نسبة الكلس المضافة، حيث كانت أعلى قفزة في قيم CBR عند الانتقال من نسبة 6% إلى نسبة 9% كلس (ازدادت قيمة CBR من 62% إلى 85% بعد 28 يوم)، بينما عند الانتقال من نسبة 9% إلى 12% كلس كانت الزيادة محدودة (ازدادت قيمة CBR من 85% إلى 90% بعد 28 يوم) ويمكن تفسير ذلك بوصول تراكيز شوارد الكالسيوم إلى مستوى يكفي لاستهلاك السيليكا والألومينا المتاحة للتفاعلات البوزولانية هذا من جهة، من جهة أخرى قد تحتوي التربة على كمية محدودة من الفلزات الغضارية الفعالة مثل المونتموريللونيت والتي تنوب في الوسط القلوي مما يحد من النواتج الاسمنتية المتولدة بعد نسبة معينة. قام Rabab'ah وزملاؤه عام 2021 بدراسة تأثير إضافة الكلس على قيمة CBR في الترب الغضارية المنفخة حيث تبين زيادة قيمة ال CBR من 1.6% للتربة الأصلية إلى 25.5% بعد إضافة الكلس بنسبة 2% [29].



الشكل (5) نتائج تجربة CBR

يبين الجدول 5 طريقة AASHTO في تقييم تربة الأساس للطرق وفقاً لقيم ال CBR [25] ، وبمقارنتها مع قيم CBR الناتجة بعد اضافة الكلس نجد ان نسبة 4% كلس عند زمن معالجة (7،14 يوم) أنتقلت التربة من سيئة جدا الى متوسطة ، وعند نسبة 6% كلس وزمن معالجة 14 يوم أصبحت التربة جيدة ، وأصبحت التربة جيدة جدا عند نسبة 6% وزمن معالجة 28 يوم ونسبة 9% و 12% عند أزمنة 7،14،28 يوم .

الجدول (5) طريقة AASHTO في تقييم تربة الأساس للطرق [25]

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

وبحسب الشروط والمواصفات الفنية العامة لأعمال الطرق والجسور الصادر عن وزارة المواصلات السورية والمبينة في الجدول 6 فإن القيم المعتمدة للتربة والمواد المستخدمة في طبقات الطريق تكون مقارنة ل مواصفات AASHTO مع بعض الاختلافات التنفيذية المحلية. وفي ضوء هذه المواصفات فإن جميع نسب الكلس المستخدمة تفي بمتطلبات تربة التأسيس (subgrade) حيث تجاوزت قيم CBR الحد الأدنى (5%) بكثير كما انخفض دليل اللدونة (PI) إلى أقل من 20، مما يلغي خطر الانتفاخ، أما بالنسبة لطبقة ما تحت الأساس (Subbase) تظهر التربة ذات نسب الكلس الأعلى (9% و 12%) بعد 28 يوم معالجة أداء جيداً حيث حققت هذه النسب قيم CBR تتجاوز 80% و 85% على التوالي، وهي أعلى بكثير من الحد الأدنى المطلوب (30%)، كما انخفضت قيمة ال PI إلى حدود 9-11، مما يقربها من الحد الأقصى المسموح به (6) ويقلل من اللدونة بشكل كبير، إلا انه لا يمكن القول انها أصبحت مناسبة للاستخدام في طبقة ماتحت الأساس (Subbase) بسبب عدم تحقيق شرط اللدونة المسموح (6).

الجدول (6) البنود الخاصة بـ CBR و PI في المواصفة السورية للطرق (2002) [26]

القيم المطلوبة حسب المواصفات السورية	الخاصية	طبقة الطريق
لا تقل عن 5% بعد الغمر	CBR	تربة التأسيس (subgrade)
أقل من 20	PI	تربة التأسيس (subgrade)
لا تقل عن 30%	CBR	طبقة ماتحت الأساس (subbase)
أقل من 6	PI	طبقة ماتحت الأساس (subbase)
لا تقل عن 80%	CBR	طبقة الأساس الحصوية (base course)
أقل من 4 أو NP	PI	طبقة الأساس الحصوية (base course)

كذلك الأمر بالنسبة لطبقة الأساس الحصوية (Base Course) فعلى الرغم من أن نسبة (9% كلس) بعد زمن معالجة 28 يوم أنتجت قيمة $CBR = 85\%$ متفوقة على الحد الأدنى المطلوب البالغ 80 % ، إلا أن شرط اللدونة مازال غير محقق حيث سجلت $PI = 11$ وهي أعلى من الحد المثالي المسموح (4) .

5- الاستنتاجات والتوصيات:

1. أظهرت نتائج الدراسة أن عملية تحسين التربة الغضارية عالية اللدونة بالكلس الحي تتم عبر مرحلتين أساسيتين: الأولى تبدأ خلال الأسبوع الأول من المعالجة نتيجة حدوث التبادل الشاردي الذي يؤدي إلى انخفاض دليل اللدونة وتحسن قابلية تشغيل التربة، تلي هذه المرحلة مرحلة التثبيت البوزولاني طويل الأمد، حيث ساهمت نواتج التفاعل الكيميائي في تكوين روابط إسمنتية مسؤولة عن الجزء الأكبر من التحسن في الخصائص الميكانيكية للتربة .
2. بينت النتائج أن إضافة 9% من الكلس الحي مع مدة معالجة بلغت 28 يوماً تمثل النسبة المثلى لتحقيق أفضل أداء هندسي للتربة، حيث ارتفعت قيمة CBR إلى 85% ووصلت مقاومة الضغط غير المطوق (UCS) إلى 1150 kPa، كما أظهرت النتائج أن زيادة نسبة الكلس إلى 12% لم تحقق سوى تحسناً محدوداً الأمر الذي يشير إلى الدخول في مرحلة تناقص العائد من الناحية الهندسية والاقتصادية .
3. أوضحت نتائج الدراسة أن التربة المعالجة بنسبة 9% كلس حققت نحو 85% من مقاومة الضغط غير المطوق النهائية خلال أول 14 يوماً من المعالجة (980 kPa)، في حين وفرت مدة 28 يوماً ظروفاً أكثر أماناً لضمان اكتمال التفاعلات البوزولانية وتحقيق الاستقرار طويل الأمد، الأمر الذي يوفر مرونة عملية في الجدول الزمني لتنفيذ مشاريع الطرق.
4. توصي الدراسة باستخدام الكلس الحي بنسبة 9% عند زمن معالجة 28 يوماً لتحسين الترب الغضارية عالية اللدونة المستخدمة في طبقة التأسيس (subgrade) في مشاريع الطرق في المنطقة المحلية المدروسة ، لما يحققه ذلك من تحسن ملحوظ في قيم CBR ومقاومة الضغط غير المطوق مع كفاءة اقتصادية جيدة.
5. يوصى بإجراء دراسات مستقبلية لتقييم الأداء طويل الأمد للتربة المثبتة بالكلس تحت تأثير الظروف البيئية المختلفة، مثل دورات التجفيف والترطيب والتغيرات الحرارية، إضافة إلى دراسة إمكانية دمج الكلس مع مواد مضافة أخرى لتحسين خصائص التربة بصورة أكبر .

References:

- [1] S. Haas and H.-J. Ritter, "Soil improvement with quicklime – long-time behaviour and carbonation," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 20, no. 8, pp. 1941–1951, May 2018, doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1474793>.
- [2] M. Sofwan, L. Samang, T. Harianto, and A. Bakri Muhidin, "The compressive strength improvement on softsoil subgrade with Quicklime stabilization, activated Gum Rosin and Iron Oxide," *MATEC Web of Conferences*, vol. 181, p. 01002, 2018, doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201818101002>.
- [3] W. J. Negawo, G. Di Emidio, A. Bezuijen, R. D. Verastegui Flores, and B. François, "Lime-stabilisation of high plasticity swelling clay from Ethiopia," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 23, no. 4, pp. 504–514, Mar. 2017, doi: <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1304272>.
- [4] X. Cheng, B. Li, G. Chen, and S. Gao, "Solidification/Stabilization of Textile Sludge as Subgrade: Usage of Binders and Skeleton Material," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2020, no. 1, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.1155/2020/8873098>.
- [5] D. Padmaraj, C. Cherian, and D. N. Arnepalli, "Accelerated carbonation of lime-treated clayey geomaterials: A synergistic strategy for sustainable earthworks and carbon capture applications," *Construction and Building Materials*, vol. 455, p. 139078, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139078>.
- [6] S. Fullalove, "Lime Mix Stabilises Subgrade," *New Civil Engineer*, no. 509, Sep. 1982, Accessed: Apr. 05, 2026. [Online]. Available: <https://trid.trb.org/view/189295>
- [7] Y. Ma and W. Chen, "Study on the Mechanism of Stabilizing Loess with Lime: Analysis of Mineral and Microstructure Evolution," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, pp. 1–11, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1155/2021/6641496>.
- [8] F. S. Ackah, Y. Zhihao, and F. Huaiping, "Experimental Evaluation of Stiffness Properties of a Quicklime-Stabilized Clay Subgrade Using a Resistivity Plate Loading Testing Device," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2678, no. 2, pp. 520–536, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.1177/03611981231175897>.
- [9] A. T. Sudjianto, A. D. C. D. J. Vili, A. Suraji, R. Riman, and S. H. Susilo, "The effect of adding quicklime on stabilization of expansive soils," *Technology audit and production reserves*, vol. 2, no. 3(82), pp. 12–17, Apr. 2025, doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.326784>.
- [10] W. Brand and W. Schoenberg, "Classification of German Soils and their Stabilization with Lime," *Highway Research Board Bulletin 231*, pp. 69–80, 1959.

- [11] P. Li, H. S. Li, H. Q. Liu, and X. L. Wang, "Application for Quick Lime Improving Strength of Loess Subgrade," *Advanced Materials Research*, vol. 168–170, pp. 2678–2682, Dec. 2010, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.168-170.2678>.
- [12] H. Regasa, M. Jothimani, and Y. Oyda, "Subgrade soil stabilization using the Quicklime: a case study from Modjo- Hawassa highway, Central Ethiopia," *International journal of geo-engineering*, vol. 14, no. 1, Oct. 2023, doi: <https://doi.org/10.1186/s40703-023-00197-8>.
- [13] J. Moore, P. Akula, S. Ray, A. Bastola, P. J. Noell, and J. Rimsza, "Carbon sequestration into lime-stabilized soils: Engineering and mineralogical characterization," *Journal of Cleaner Production*, vol. 488, p. 144613, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144613>.
- [14] O. S. M. Hamza, M. M. E. Zumrawi, and A. E. M. Mohamed, "Effect of Pozzolana and Lime on Expansive Soil Properties," *FES Journal of Engineering Sciences*, vol. 9, no. 3, pp. 94–101, Feb. 2021, doi: <https://doi.org/10.52981/fjes.v9i3.702>.
- [15] K. Gu, F. Jin, Abir Al-Tabbaa, B. Shi, C. Li, and L. Gao, "Incorporation of reactive magnesia and quicklime in sustainable binders for soil stabilisation," *Engineering Geology*, vol. 195, pp. 53–62, Sep. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.025>.
- [16] A. A. Amadi and A. Okeiyi, "Use of quick and hydrated lime in stabilization of lateritic soil: comparative analysis of laboratory data," *International Journal of Geo-Engineering*, vol. 8, no. 1, Mar. 2017, doi: <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0041-3>.
- [17] P. Skels, A. Bondars, and I. Paeglitis, "Quicklime (CaO) stabilization of fine-grained marine sediments in low temperature areas.," in *3rd International Conference Civil Engineering.*, 2011.
- [18] M. El Gendy, A. Mohamady, and M. Shams, "Constructing Highway Pavements over Soft Clay Soil Improved by Quicklime," *Port-Said Engineering Research Journal*, vol. 23, no. 2, pp. 20–25, Sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.21608/pserj.2019.49555>.
- [19] Z. Saing, L. Samang, T. Harianto, and J. Patanduk, "Quick Lime Stabilization of Ferro Laterite Soil to Subgrade Material Implementation," *International Journal of Science and Research*, vol. 5, no. 11, pp. 582–586, 2016.
- [20] P. Kaur, "Soil Improvement with Lime," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 51–53, 2012, doi: <https://doi.org/10.9790/1684-0115153>.
- [21] N. Ghazouani, "Quicklime-stabilized Tuff and Clayey Soils for Highway A3 Construction in Northern Tunisia," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 14, no. 2, pp. 13511–13516, Apr. 2024, doi: <https://doi.org/10.48084/etasr.6955>.

- [22] J. H. Beeghly, "Recent experiences with lime-fly ash stabilization of pavement subgrade soils, base, and recycled asphalt," in *International ash utilization symposium*, University of Kentucky, Center for Applied Energy Research Lexington, KY, Oct. 2003, pp. 20–22.
- [23] E. Barrier, L. Machhour, and M. Blaizot, "Petroleum systems of Syria," in *Petroleum Systems of the Tethyan Region*, AAPG Memoir, vol. 106, Tulsa, OK, USA: American Association of Petroleum Geologists, 2014. Available: <https://pubs.geoscienceworld.org/aapg/books/edited-volume/1510/chapter/107202818>
- [24] ASTM D6276-99, *Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 1999.
- [25] L. Kenneth, B. Andrew, "Iowa Thickness Design Guide for Low Volume Roads Using Reclaimed Hydrated Class C Fly Ash Bases," in *Transportation Conference Proceeding*, 1998, pp. 253–258.
- [26] Ministry of Transport, "General Technical Specifications for Road and Bridge Works, Part III: Granular Material Layers," (in Arabic) Damascus, Syria., 2002.
- [27] M. Al-Mukhtar, S. Khattab, and J.-F. Alcover, "Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil," *Engineering Geology*, vol. 139–140, pp. 17–27, Jun. 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.04.004>.
- [28] S. Almuaythir, M. S. I. Zaini, and M. Hasan, "Shear strength, compressibility, and consolidation behaviour of expansive clay soil stabilized with lime and silica fume," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, Jul. 2025, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10642-6>.
- [29] S. R. Rabab'ah, M. M. Taamneh, H. M. Abdallah, O. K. Nusier, and L. Ibdah, "Effect of Adding Zeolitic Tuff on Geotechnical Properties of Lime-Stabilized Expansive Soil," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 25, no. 12, pp. 4596–4609, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1603-7>.