



Permeability of high plasticity clayey soil stabilized with lime and perlite

Erol Şadoğlu^{*}, Ümit Çalik

Department of Civil Engineering, Karadeniz Technical University, Trabzon, 61080, Turkey

Highlights:

- Permeability of high plasticity clayey soil stabilized with lime and perlite
- Effect of lime stabilization on permeability of high plasticity clayey soil
- Effect of perlite on permeability of high plasticity clayey soil

Keywords:

- Stabilization of clayey soil
- Lime
- Perlite
- Permeability

Article Info:

Research Article

Received: 28.11.2018

Accepted: 31.05.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.488720

Correspondence:

Author: Erol Şadoğlu
e-mail: esadoglu@ktu.edu.tr
phone: +90 462 377 26 64

Graphical/Tabular Abstract

Chemical stabilization leads to changes in soil properties such as strength, plasticity, compaction and durability, as well as in its permeability. Lime stabilization causes significant increase in permeability of clays. Lime stabilization of clayey soils results in flocculation, that is, calcium and magnesium ions lead to thinning of absorbed water layer and formation of lumpy structure. Since larger gaps are formed between the flocculent agglomerates, the permeability of the soil increases significantly with lime stabilization. Permeability of soil is important in ground water flow and leakage problems. However, there are few studies about the effect of chemical stabilization on permeability. In this study, the effects of chemical stabilization with lime and perlite combinations on permeability of a high plasticity clayey soil were investigated. The change in permeability coefficients of soil-perlite and soil-lime-perlite mixtures depending on the perlite ratio is shown in Figure A.

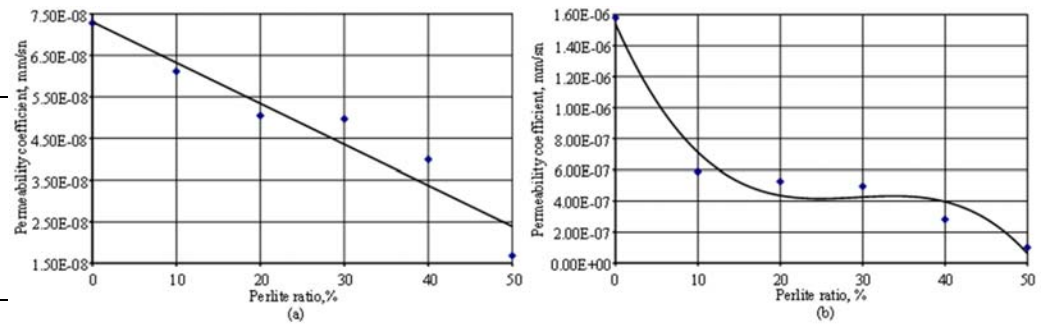


Figure A. Variation of permeability coefficient with perlite ratio (a) Soil-perlite (b) Soil-lime-perlite

Purpose: The aim of the study is to investigate the effect of chemical stabilization with lime and perlite on permeability of a high plasticity clayey soil.

Theory and Methods:

In this study, perlite and lime combinations were used for chemical stabilization of high plasticity clayey soil. The experimental research process is planned to consist of two stages. In the first stage only perlite was used as stabilization additive and in the second stage perlite and lime were used together for stabilization. The optimum percentage of lime was added to the mixtures of the second stage. The effects of the additives (perlite and lime) on the hydraulic properties of the clayey soil were investigated by permeability tests carried out in accordance with ASTM D 5856.

Results:

6 soil-perlite and 6 soil-lime-perlite mixtures were prepared by adding 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% perlite and 8% lime (only in soil-lime-perlite mixtures) to high plasticity clayey soil containing smectite group clay minerals. Thus, depending on perlite ratio, the permeability properties of the mixtures were investigated. The permeability coefficient of soil-perlite mixtures decreased with increasing perlite ratio and the permeability coefficient of the mixture containing 50% perlite was about three times less than that of the clayey soil. Similar to soil-perlite mixtures, permeability coefficients of soil-lime-perlite mixtures decreased with increasing perlite ratio. The permeability coefficient of the soil-lime-perlite(50%) mixture was reduced by approximately 15 times compared to the soil-lime mixture. Therefore, the problem of high permeability in lime-stabilized clays can be overcome by pozzolanic additives such as perlite.

Conclusion:

Lime stabilization of high plasticity clayey soils causes significant increases in permeability. The use of perlite as a pozzolanic additive reduces the permeability of the soil-perlite and the soil-lime-perlite mixtures with increasing perlite content.



Kireç ve perlite stabilize edilen yüksek plastisiteli kil zeminin geçirimsizliği

Erol Şadoğlu*^{ID}, Ümit Çalık^{ID}

Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü 61080 Trabzon, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Yüksek plastisiteli kil zeminin kireç ve perlit ile stabilizasyonu
- Kireçle stabilizasyonun yüksek plastisiteli kil zeminin geçirimsizliğine etkisi
- Perlitin yüksek plastisiteli kil zeminlerin geçirimsizliğine etkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 28.11.2018

Kabul: 31.05.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.488720

Anahtar Kelimeler:

Kil zemin stabilizasyonu,
kireç,
perlit,
geçirimsizlik

ÖZET

Çeşitli katkılarla kimyasal reaksiyonlar yaptırılarak, zeminin mühendislik özelliklerinin değiştirilmesine kimyasal stabilizasyon denir. Mekanik stabilizasyon ile yeterli düzeyde ıslah edilemeyen zeminlere kimyasal stabilizasyon uygulanır. Kimyasal stabilizasyon zeminin mukavemet, plastisite, kompaksiyon, durabilite gibi özelliklerinde değişime yol açtığı gibi geçirimsizlik özelliğinde de değişime yol açmaktadır. Zeminlerin geçirimsizliği, yeraltı suyu akımı ve sızma problemlerinde önem arz etmektedir. Fakat kimyasal stabilizasyonun geçirimsizlik üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmalar oldukça azdır. Bu çalışmada, yüksek plastisiteli kil zeminin kireç ve perlit kombinasyonları ile kimyasal stabilizasyonunun, geçirimsizlik üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yüksek plastisiteli kil zeminlerin kireçle stabilizasyonunda, karışımın geçirimsizliğinde 25 kata varan artışlar meydana gelmektedir. Ayrıca bu tür zeminlerin stabilizasyonunda ikincil katkı olarak kullanılabilen perlit geçirimsizlikte önemli azalmalara sebep olmaktadır.

Permeability of high plasticity clayey soil stabilized with lime and perlite

H I G H L I G H T S

- Permeability of high plasticity clayey soil stabilized with lime and perlite
- Effect of lime stabilization on permeability of high plasticity clayey soil
- Effect of perlite on permeability of high plasticity clayey soil

Article Info

Research Article

Received: 28.11.2018

Accepted: 31.05.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.488720

Keywords:

Stabilization of clayey soil,
lime,
perlite,
permeability

ABSTRACT

Chemical stabilization is defined as modification of engineering properties of soil with chemical reactions of various additives. Chemical stabilization is applied to the soils which cannot be adequately treated by mechanical stabilization. Chemical stabilization leads to changes in soil properties such as strength, plasticity, compaction and durability, as well as in its permeability. Permeability of soil is important in ground water flow and leakage problems. However, there are few studies about the effect of chemical stabilization on permeability. In this study, the effects of chemical stabilization with lime and perlite combinations on permeability of high plasticity clayey soil were investigated. With the stabilization of high plasticity clayey soils with lime, the permeability of the mixture increases up to 25 times. Moreover, perlite which can be used as a secondary additive in stabilization of such soils causes serious decrease in permeability..

1. GİRİŐ (INTRODUCTION)

Bina, köprü, yol ve baraj gibi mühendislik yapılarının üzerinde inşa edileceği zeminler her zaman uygun özelliklerde olmayabilir. Kentlerin büyümesi ve sanayi yapılarının artması ile sağlam zemin bölgelerinin azalması düşük direnç ve yüksek deformasyon özellikli zayıf zeminlerin üzerine de yapıların inşasını zorunlu hale getirmiştir. Buna paralel olarak problem yaratan zayıf zeminler için uygun bir mühendislik çözümü ile sorunun giderilmesi çalışmaları da başlamıştır.

Zayıf zeminlerin oluşturduğu ortamlarda geoteknik mühendisleri aŐađda genelleştirilmiş alternatiflerden birine karar vermek durumundadır:

- Uygun olmayan zemini olduğu gibi kabul etme,
- Uygun olmayan zemini atıp yerine uygun bir zemin koyma,
- Uygun olmayan zemini ıslah etme.

Birinci alternatif, zeminin zayıf özellikleri göz önüne alınarak üzerine inşa edilecek mühendislik yapılarına (mühendislik dolguları, sanat yapıları vb.) ait temel sistemlerinin bu zayıflıklara karşı koyabilecek şekilde ve tipte tasarlanmasıdır. İkinci alternatif, uygun olmayan zeminin kazılması ve kazılan zeminin uygun bir depo yerine taşınması, yerine konacak uygun zemin için bir malzeme ocağının bulunması, malzeme ocağında hafriyat yapılması, uygun olmayan zeminin olduğu yere taşınması ve sıkıştırılması işlemlerini kapsar. Bunlar ise zaman alıcı olduğu gibi çok büyük bir maliyetle de karşı karşıya kalılabilmektedir. Üçüncü alternatifte değişik zemin ıslah teknikleri ile zayıf mühendislik özelliklerine sahip doğal zeminin iyileştirilerek kullanılmasıdır [1].

Bir çok araştırmacı ise stabilizasyon tekniklerini genellikle mekanik stabilizasyon ve kimyasal stabilizasyon olarak iki ana grup altında toplamaktadırlar [2-6]. Mekanik stabilizasyon, fiziksel işlemlerle zeminlerin fiziksel, hidrolük ve mekanik özelliklerini değiştirmeye yarayan yöntemleri içermektedir. Bu yöntemler, zemine ihtiyaca göre ince veya iri boyutlu malzeme karıştırarak iyi derecelenmiş ve sıkı zemin karışımları elde etmeyi sağlarlar. Mekanik stabilizasyon işlemleri ile zeminin sıklığında, mukavemetinde, dren kabiliyetinde ve hacimsel stabilitesinde pozitif değişimler sağlanır. Mekanik stabilizasyon ile iyileştirilemeyen zeminlere, çeşitli katkılarla kimyasal reaksiyonlar yaptırılarak zemin mühendislik özelliklerinin değiştirilmesi esasına dayanan işlemlere kimyasal stabilizasyon denir [2].

Kimyasal stabilizasyonda; kireç, imento, puzolan, bitüm tek başına kullanılabildiği gibi kireç-imento, kireç-asfalt ve kireç-imento-puzolan gibi stabilizatör kombinasyonları da tercih edilebilir [7, 8]. Zemin katkılarının bu tür birlikte kullanılmaları, tek başına kullanılmalarından daha çok avantaj sağlamaktadır. Örneğin kireç zeminin

işlenebilirliğini artırırken, plastisitesini düşürmektedir. Daha sonra katılan imento ise zeminin mukavemetini hızla artırır. Aynı şekilde bitüme katılan kireç, asfalt yol kaplamasından zemin tanelerinin soyulmasına engel olmakta ve karışımın stabilitesinin artmasını sağlamaktadır.

Zemine katılan kimyasal reaksiyon yapma kabiliyetine sahip katkılar, stabilizasyonda oldukça etkili olsalar da, kullanımda bazı kısıtlamalar mevcuttur. Çimento ve kireç gibi kalsiyum kökenli çoğu katkı sülfatça zengin zeminlerde zamanla şişme problemine sebep olmaktadır [3]. İnce taneli ve organik zeminlerde imento katkılı stabilizasyon çalışmaları ekonomik olmamaktadır [4]. Sızma probleminin olduğu yerlerde ve iri taneli zeminlerde kireç ile stabilizasyon yapılamamaktadır [5, 6]. Uçucu küllerin bileşimindeki ağır metallere dolaylı evre ve su kirliliği sorunları yaratabilmektedir. Bitüm ile yapılan stabilizasyonda, killi zeminlerden ziyade granüler zeminlerde uygulanabilmektedir [4].

Kimyasal stabilizasyon, zeminin birçok geoteknik özelliğinde değişikliğe yol açtığı gibi geçirimsizlik özelliğinde de değişikliğe yol açmaktadır. Bu konuyla ilgili az sayıda çalışma olmakla birlikte Kumar ve Sharma [9], uçucu külün şişen zeminin geçirimsizlik özelliği üzerindeki etkisini incelemiştir. %0, %5, %10, %15 ve %20 uçucu kül oranlarında karışımlar hazırlanmış ve uçucu külün kullanımının zeminin geçirimsizliğini azalttığı tespit edilmiştir. Sivapullaiah ve Lakshmikantha [10], kireçsiz ve %1 kireç katkılı %100 illitli, %80 illitli ve %20 bentonitli üç farklı zemin karışımının geçirimsizlik özelliğini araştırmışlardır. İllitli ve bentonitli karışımda, %1 kirecin etkisinin incelenmesi için hemen, 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük olmak üzere farklı deney zamanları seçilmiştir. Zeminde hemen görülen değişiklik, geçirimsizliğin artışıdır. Kür zamanları sonunda ise kür zamanı ile birlikte geçirimsizlikte azalma görülmüştür. İllitli zemine katılan %20 bentonit geçirimsizlik katsayısını azaltmıştır. Wong vd. [11] bataklık zemininin; yüksek fırın cürufu, Portland imentosu ve silika kumu ile stabilizasyonunun geçirimsizliğe etkisini araştırmışlardır. Silika kumu karışımlara filler olarak katılmıştır. Çimento ve yüksek fırın cürufu karışımları için; %75 imento + %25 cüruf, %50 imento + %50 cüruf, %25 imento + %75 cüruf olmak üzere üç farklı birleşim seçilmiştir. Farklı imento ve cüruf birleşimlerinden 200 kg/m³, 250 kg/m³, 300 kg/m³lık dozajlar belirlenerek silika kumlu ve silika kumsuz karışımlar hazırlanarak bataklık zeminine katılmıştır. Çimento, yüksek fırın cürufu ve silika kumunun birlikte kullanıldığı karışımların geçirimsizlik katsayıları doğal zemine göre daha düşüktür. Örneğin doğal durumda 6,343x10⁻⁶ m/sn olan geçirimsizlik katsayısı, %50 imento + %50 cürufu karışımdan 300 kg/m³ dozajında filler olarak eklenen silika kumu ile 4,006x10⁻⁶ m/sn olmuştur.

Kimyasal stabilizasyon doğal zeminlerin; mukavemet, plastisite, durabilite, kompaksiyon, geçirimsizlik gibi özelliklerinde değişikliğe yol açmaktadır. Zeminlerin geçirimsizliği, yeraltı suyu akımı ve sızma problemlerinde

önem arz etmekle birlikte kimyasal stabilizasyonun geçirimsizlik üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmalar oldukça azdır. Bu çalışmada, yüksek plastisiteli kil zeminin kireç ve perlit kombinasyonları ile kimyasal stabilizasyonunun, geçirimsizlik katsayısı üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Bu çalışma kapsamında, yüksek plastisiteli doğal kil zeminin kimyasal stabilizasyonu için, çeşitli oranlarda perlit ve kireç kombinasyonları kullanıldı. Bu malzemelerin fiziksel, kimyasal ve diğer mühendislik özellikleri ile ilgili bilgiler aşağıda verilmektedir.

2.1. Yüksek Plastisiteli Kil Zemin (High Plasticity Clayey Soil)

Yüksek plastisiteli kil zemin, Trabzon İli Merkez ilçesine bağlı Gürbulak beldesinden tedarik edilmiştir. Zemin yüzeyinden yaklaşık 1,5 m derinlikten کافی miktarda doğal malzeme alınarak Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik ve Ulaştırma Laboratuvarına getirilmiştir. Stabilize edilmemiş doğal malzeme etüvde kurutularak ASTM 200 No.lu elekten elenmiştir. 200 No.lu elekten geçen doğal malzemenin X-ışını kırınım deseni (difraktogram), ASTM D 934'e [12] uygun şekilde elde edilmiştir.

Difraktometre tarafından çizilen X-ışınları kırınım deseni Şekil 1'de verilmiştir. Buna göre kil zemin içindeki başlıca minerallerin; nontronit, montmorillonit ve kalsit olduğu ortaya çıkmıştır. X-ışınları kırınım analizine göre doğal malzemede baskın olan kil mineralleri nontronit ve montmorillonittir. Bu iki mineral smektit grubu killerin alt grubudur. Smektit mineralleri, iki silika tetrahedron plakası arasında tek alümina oktahedron plakasının ardı ardına dizilip arasına çok zayıf su molekül bağı ve katyonların mevcut olduğu bir yapıya sahiptir. Smektit grubu kil

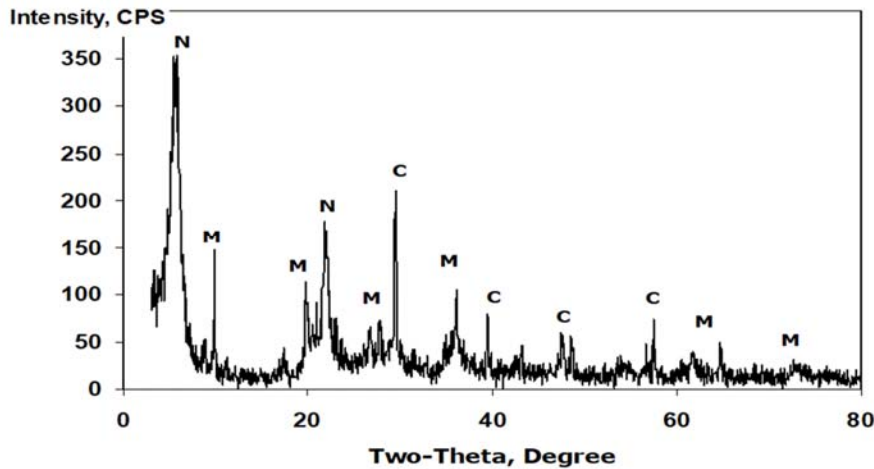
minerallerinin mühendislik açısından dikkati çeken yönü suyla temas ettiklerinde aşırı hacim değişimi yaparak yapıları olumsuz etkilemeleridir.

Zeminlerin mineralojik yapısı; plastisite, şişme potansiyeli, sıkışma, dayanım, durabilite ve geçirimsizlik özellikleri üzerinde etkin bir rol oynamaktadır. Ancak zeminin mineralojik yapısını incelemek yerine tane kompozisyonu (biçimi ve tane dağılımı vb.) ve mühendislik özellikleri (kıvam limitleri, kohezyon, içsel sürtünme açısı vb.) ile zemin özellikleri saptanmaya çalışılmaktadır. Çünkü zeminin mineralojik yapısı ile geoteknik özellikleri arasında doğrudan ilişkiler aşırı heterojen yapı sebebiyle mümkün olmamaktadır. Doğal malzemenin geoteknik özellikleri zemin mekaniği deneyleri ile saptanarak Tablo 1'de özetlenmiştir. Doğal zemine ait geçirimsizlik katsayısı, optimum su içeriğinde standart Proktor enerjisi ile sıkıştırılan numuneler üzerinde ASTM D 5856 [13] standartına uygun yürütülen düşen düzeyli geçirimsizlik deneyi ile elde edilmiştir.

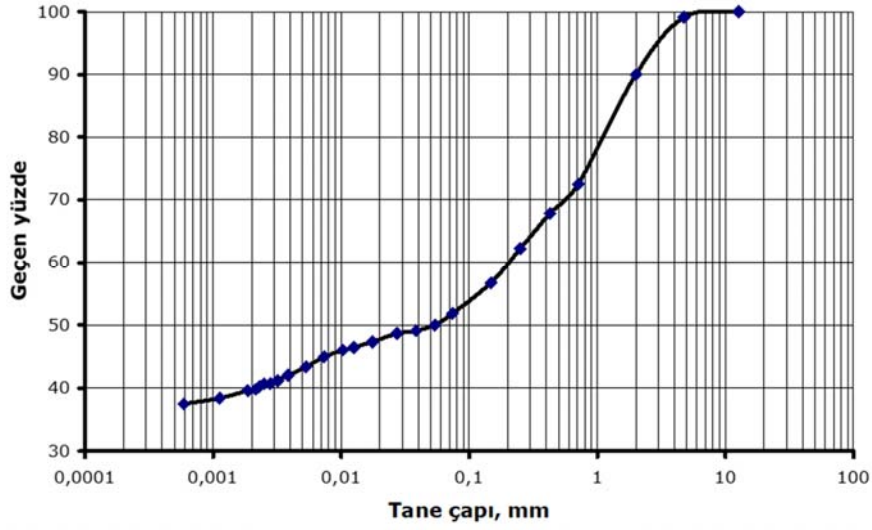
Doğal malzemenin tane boyutu dağılımı (gradasyon) eğrisinin belirlenmesi için elek analizi ve hidrometre deneyi yapılmıştır. Bu deneylere ait tane boyutu dağılımı eğrileri kombine yöntem ile birleştirilerek Şekil 2'de gösterilmiştir. Doğal zemin, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır.

Aktivite, kilin su ile etkileşiminin ne derece olduğuna yönelik bir kavram olarak tanımlanabilir. Zeminin plastisite indisi ve kil miktarına bağlı olarak Eş. 1 ile hesaplanmaktadır.

$$A = \frac{PI(\%)}{\text{Kil miktarı}(\%)} \quad (1)$$



Şekil 1. Kil zemine ait X-ışını kırınım deseni (N: Nontronit M: Montmorillonit C: Kalsit)
Nontronit: $\text{Na}_{0,3}\text{Fe}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{OH}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ Montmorillonit: $\text{Na}_{0,3}(\text{AlMg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{OH}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – Kalsit: CaCO_3)
(X-ray diffraction pattern of clayey soil N: Nontronite M: Montmorillonite C: Calcite)
(Nontronite: $\text{Na}_{0,3}\text{Fe}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{OH}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; Montmorillonite: $\text{Na}_{0,3}(\text{AlMg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{OH}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; Calcite: CaCO_3)



Şekil 2. Doğal zemine ait tane boyutu dağılım eğrisi (Grain size distribution curve of clayey soil)

Aktivite katsayısı (A); 0,75'den küçük olan killer aktif olmayan killer, 0,75-1,25 arasında olanlar normal killer, 1,25'den büyük olanlar ise aktif killer olarak kabul edilmektedir [17]. Tablo 1'de verilen LL = 87,2, PI = 58,3 ve SL = 14,4 değerleri; Şekil 2'de verilen %39,7 kil yüzdesi ile sahip olduğu 1,47 kil aktivitesi ve kimyasal yapısındaki smektit grubu kil mineralleri, doğal malzemenin şişme potansiyeline sahip olduğunun göstergeleri olarak kabul edilebilir.

Tablo 1. Kil zeminin geoteknik özellikleri
(Geotechnical properties of clayey soil)

Özellik	Değer	Standart
Renk	Sarımtı rak	
Likit limit, LL (%)	87,2	
Plastik limit, PL (%)	28,9	ASTM D 4318
Büzülme limiti, SL (%)	14,4	[14]
Plastisite indeksi, PI (%)	58,3	
Özgül ağırlık, G _s	2,59	ASTM D 854 [15]
Standart kompaksiyon parametreleri		
Geçirimsizlik katsayısı, mm/sn	7,281x 10 ⁻⁸	ASTM D 5856 [13]
Optimum su içeriği, w _{opt} (%)	24,5	ASTM D 698
Maksimum kuru yoğunluk, ρ _{d,maks.} (Mg/m ³)	1,461	[16]

Organik madde içeren zeminin tanımlanmasında zeminin doku, renk ve koku tetkikleri yanında etüvde ve havada kurutulmuş şekilde hazırlanmış iki numunenin likit limit deney sonuçlarının karşılaştırmasının yapılması yoluna da başvurulmaktadır. Eş. 2'de görülen oranın 0,75 sınır değerinden yüksek veya küçük olmasına göre zemin inorganik veya organik olarak nitelendirilmektedir [18].

$$\frac{LL [etüv kuru]}{LL [hava kuru]} \geq 0,75 \quad (2)$$

Tablo 1'deki doğal malzemenin LL değeri havada kurutulmuş deney numunesinin LL değeridir. Doğal malzemenin 100°C (± 5°C) sıcaklığındaki etüvde kurularak hazırlanan diğer deney numunesinin LL değeri ise 73,9 çıkmıştır. Buna göre havada ve etüvde kurutulmuş numunelerin likit limit değerlerinin birbirine oranı 0,85 çıktığından doğal malzeme inorganik bir zemindir. Likit limit değerlerinin kıyaslanması ile doğal malzemenin organik olmadığı ortaya çıkarılmasına rağmen Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı ve Malzeme Laboratuvarı'ndaki yüksek sıcaklığa çıkabilen izolasyonlu fırın yardımıyla ASTM D 2974 [19] 'e göre organik madde tayini yapılarak %4,8 organik madde içerdiği ortaya çıkarılmıştır.

Stabilizasyon çalışmalarını olumsuz etkileyen en zararlı maddeler zeminde bulunabilecek organik madde ve sülfat iyonudur. Bu yüzden iki maddenin varlığının araştırılması stabilizasyon çalışmaları için gereken ön çalışmalardandır. Sülfat içeren zeminlerin çimentolaşma ürünleri arasındaki etrenjit ve tomasitin ortamda mevcut su ile reaksiyonu sonucu zeminde şişme problemleri meydana getireceğinden doğal malzemenin sülfat içeriğinin tespitine karar verilmiştir. Kil zemin üzerinde Karadeniz Teknik Üniversitesi Kimya Bölümü'nde TS EN 1744-1 [20]'e göre yapılan sülfat tayini testi sonucunda sülfat içeriği 40,2 ppm olarak bulunmuştur. Sonuç olarak kil zemin stabilizasyon için, sülfat iyonu ve organik madde miktarı bakımından sorun teşkil etmemektedir.

2.2. Perlit (Perlite)

Perlit terimi magmanın asit fazında oluşan lavların soğuyup, gözle veya mikroskopla görülebilecek bir yapıda kırılmasının meydana getirdiği, kütle bünyesinde su damlacıkları bulunan, volkanik bir cam türünü ifade eder. Bu çalışmada Erzincan iline bağlı Mollaköy beldesinde yer alan perlit ocağından alınan ham, kırılmış ve elenmiş perlit agregası kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan perlitin mühendislik özellikleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Mollaköy perlitinin mühendislik özellikleri
(Engineering properties of Mollaköy perlite)

Özellik	Değer
Tanım	Konkoidal, sferidal kırıklı camsı volkanik kayaç
Renk	Beyaz, gri ve tonları
Kıvam limitleri	NP
Özgül ağırlık, G_s	2,38
Sertlik	5-6
pH	6,5
Sınıflandırma	
USCS	SW-SM (İyi derecelenmiş kum ve az silt)
AASHTO	A-1-b
Standart kompaksiyon parametreleri	
Optimum su içeriği, w_{opt} (%)	2,04
Maksimum kuru yoğunluk, $\rho_{d,maks.}$ (Mg/m^3)	1,556

Özel dokulu, iç yapısında belli oranda su içeren, asit bileşimli volkanik bir cam olarak ifade edilen perlit fibrik yapıya sahiptir. Nitrat, sülfat, fosfor, ağır metal, radyoaktif element ve organik madde içermez. Dolayısıyla kimyasal olarak oldukça saftır. İnsan sağlığı için tehlike yaratabilecek herhangi bir bileşik içermemektedir. Mollaköy perlitinin kimyasal analizi Tablo 3'de verilmektedir.

Tablo 3. Mollaköy perlitinin kimyasal özellikleri (Chemical properties of Mollaköy perlite)

Bileşik formülü	Miktar, %
SiO ₂	75,30
Al ₂ O ₃	9,35
Fe ₂ O ₃	1,36
Na ₂ O	0,05
K ₂ O	4,82
Aktif CaO	0,76
SO ₃	0,06
MgO	0,05

Mollaköy yöresi perlitinin tane boyutu dağılım eğrisi Şekil 3'de gösterilmiştir. Perlitin tane boyutu dağılım eğrisinden elde edilen 4 No.lu elek üstü = %0,0, 200 No.lu elek altı = %9, NP, $C_u = 16,7$, $C_r = 1,7$ olmak üzere USCS sınıflandırmasında SW-SM, iyi derecelenmiş kum ve az silt olarak adlandırılırken, 10 No.lu elekten geçen = %73,6, 40 No.lu elekten geçen = 29,3, 200 No.lu elekten geçen = %9, NP ve GI = 0 ile AASHTO zemin sınıflandırma sisteminde A-1-b, taş parçaları, çakıl ve kum sınıfına girmektedir.

Erzincan Mollaköy'den tedarik edilen ham perlitin X-ışını kırınım analizi Şekil 4'de verilmiştir. Bu X-ışını kırınım desenine göre mineralojik bakımdan ana bileşenleri kuvars, muskovit ve hauyndir. X-ışını kırınım deseninde

(difraktogram) kristalleşmiş minerallerin çok keskin pikler görülürken, kristalleşmemiş (amorf) katı parçacıklar yatık tepeler şeklinde bir yol izlemektedir. Bundan dolayı X-ışını kırınım eğrilerindeki yatık tepeler materyalin amorf doğasının bir işareti kabul edilmektedir. Şekil 4'deki Mollaköy yöresi ham perlitine ait X-ışını kırınım deseninde $2\theta = 25,8^\circ$ ve $45,1^\circ$ 'deki kuvarsin ana piklerindeki tepelerin yatıklığı ve yakınlığı perlitin silika yapısının amorf fazının belirtisidir.

Puzolan olarak kullanılacak malzemelerde bulunması gereken önemli özelliklerden toplam SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ miktarı, sülfat içeriği, puzolanik aktivite indeksi ve tane inceliğinin Mollaköy perlitindeki durumu Tablo 4'te gösterilmektedir.

Tablo 4. Mollaköy perlitinin Puzolan olarak özellikleri
(Puzzolanic properties of Mollaköy perlite)

	Perlit
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , %	86,01
SO ₃ , %	0,06
Puzolanik aktivite indeksi, %	
7. gün	78,00
28. gün	80,00
İncelik, %	
45 μ m elekte kalan malzeme miktarı	91,00

Tablo 4'deki özelliklerin yanı sıra stabilizasyon aktivitesini etkileyen bir diğer özellikte materyalin amorf (camsı) yapıya sahip olmasıdır. Çünkü kimyasal (puzolanik) reaksiyonlar için puzolanlar amorf yapıda olmalıdır. Örneğin ham perlit gibi zengin silis ve alümin içeriğine sahip olan killer amorf yapıda değil de kristalli yapıda olduğundan puzolanik aktiviteye sahip olamamaktadır. Ancak killer 700~900 °C arasında ısı işleme tabi tutulduğunda toz haline getirildiğinde kristal yapısı bozularak yarı amorf yapıya sahip olabilir. Böylece puzolan olarak kullanılabilir hale gelebilmektedirler.

Perlit gibi doğal puzolanlar silikat (SiO₂) ve alüminat (Al₂O₃) esaslı olmalarına rağmen yetersiz CaO içeriği nedeniyle büyük çoğunluğu kendi başlarına bağlayıcılık özelliğine ya çok az ya da hiç sahip değildirler. Uygun su içeriğinde ve normal ortam sıcaklığında kireç ve çimento gibi yüksek CaO içeren materyallerle bu eksiklik giderilebilmektedir. Bu yüzden yüksek CaO içermeyen puzolanlar, ikincil bağlayıcı maddeler olarak anılırlar. Perlitin %0,76 gibi düşük CaO içeriğinden dolayı zeminde dayanım ve durabilitede olumlu etkiler meydana getiren çimentolaşma reaksiyonları oluşmayacaktır. Perlitin aktif CaO eksikliğini kireç gibi %65'lik yüksek aktif CaO içeren bir bağlayıcı ile bu etken maddenin ortama verilmesinin sağlanması düşünülmüştür.

2.3. Kireç (Lime)

Bu çalışmada, Karsan Kireç Sanayi Ticaret A.Ş.'nin ürettiği SKK80-Söndürülmüş Kalker Kireci kullanılmıştır. Tablo

5’de bu kirece ait fiziksel özellikler ve kimyasal analiz sonuçları verilmiştir.

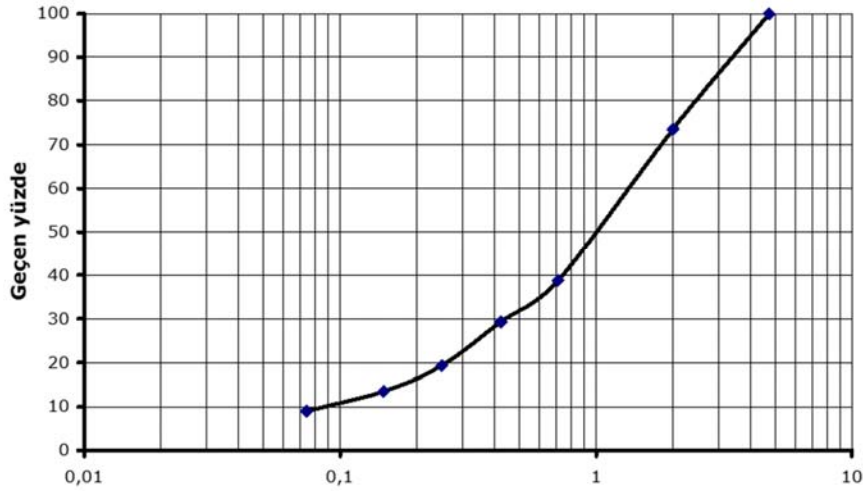
Tablo 5. Kirecin fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi (Physical properties and chemical composition of lime)

Fiziksel özellikler	Değer
200 No.lu elek üstü	% 3,8
Yoğunluk, Mg/m ³	0,48
Özgül ağırlık	2,37
pH değeri	12,4
Kimyasal bileşimi	Miktar (%)
Ca(OH) ₂	85,80
Aktif CaO	65,00
MgO	1,40
SiO ₂	0,23
Al ₂ O ₃	0,11
Fe ₂ O ₃	0,40

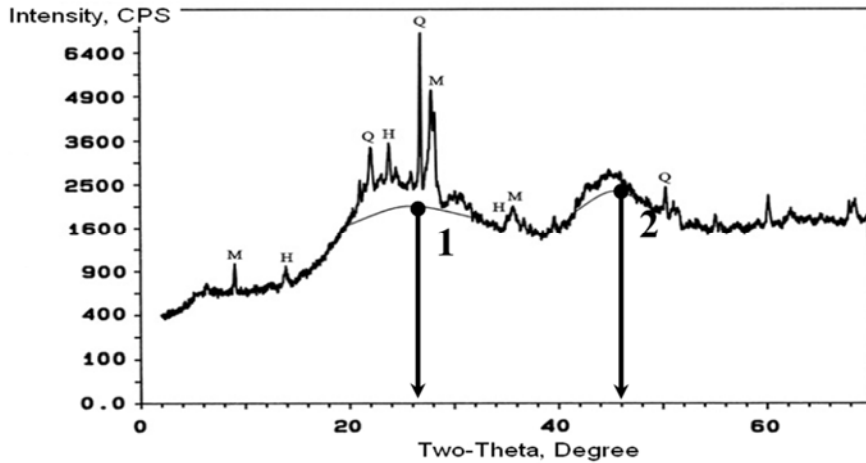
2.4. Deneyler (Experiments)

Kullanılan katkıların (perlit ve kireç) kil zeminin hidrolik özellikleri üzerinde meydana getireceği değişimler, ASTM

D 5856 [15] standardına uygun yürütülen geçirimsizlik deneyleri ile araştırılmıştır. Bu deneysel araştırma sürecinin, iki aşamadan oluşması planlanmıştır. Birinci aşamada sadece perlitin stabilizasyon katkısı olarak kullanıldığı durum, ikinci aşamada perlit ve kirecin birlikte stabilizasyonda kullanıldığı durum tetkik edilmiştir. Kirecin eklendiği ikinci aşamanın karışımlarına toplam kuru malzeme ağırlığına optimum kireç yüzdesi kadar kireç eklenmiştir. ASTM D 6276 [21] standartına uygun olarak zemin stabilizasyon çalışmalarında kullanılacak optimum kireç miktarını saptayabilmek için doğal malzemenin değişik kireç yüzdelilerindeki hidrojenin gücü (pH) belirlenmiştir. Doğal malzemenin değişik miktarlardaki kireç katkısı ile hazırlanan süspansiyonlarının pH değerinin kireç oranına bağlı olarak değişimi Şekil 5’te görülmektedir. Kireç suyla karıştırıldıktan sonra elde edilen solüsyonun pH değeri yaklaşık 12,4 civarında olduğundan bu değere karşılık gelen kireç oranı başlangıç değeri alınarak istenen minimum şartları sağlayan en düşük kireç oranı o zeminin kireç stabilizasyonundaki optimum kireç oranı olmaktadır. Şekil 5’de pH değerinin 12,4 olduğu andaki kireç miktarı yaklaşık %7,3 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3. Perlitin tane boyutu dağılım eğrisi (Grain size distribution curve of perlite)



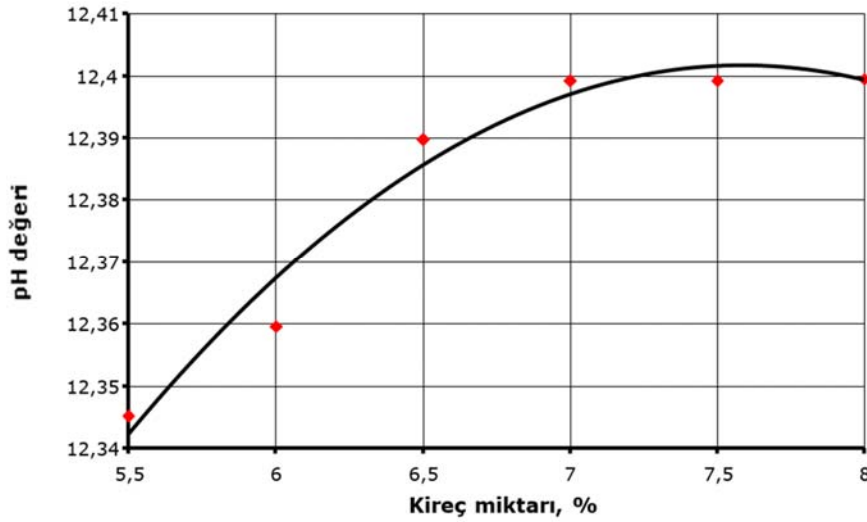
Şekil 4. Mollaköy perlitinin X-ışını kırınım deseni (X-ray diffraction pattern of Mollaköy perlite)

Puzolan-kireç kombinasyonlarıyla stabilize edilmiş temel ve alt temel tabakalarında sağlanması gereken asgari serbest basınç mukavemeti değerlerini bazı kuruluşlar tarafından önerilmiştir. 28. günlük kür sonunda sağlanması için %6,5, %7, %7,5, %8 ve %8,5 oranlarında kireç katkılı doğal malzeme karışımları hazırlanarak serbest basınç değerleri bulunmuştur. Serbest basınçları karşılaştırılan 5 farklı kireç oranından, Şekil 6'da görüldüğü gibi kuru kil zemin kütlesinin %8 oranında kireç kullanıldığında 28. günün sonunda yol temel tabakası için 3450 kPa sınır değeri 3561 kPa ile sağlanmıştır [22].

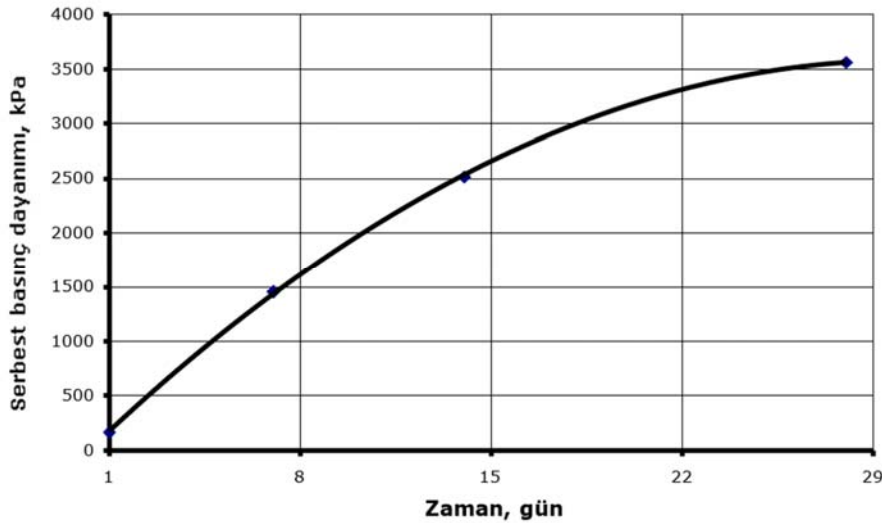
U.S.A.C.E [22]'e göre sağlanması gereken bir diğer kriter de durabilite kriteridir. Bu kritere göre, 12 ıslanma-kuruma periyodu sonunda numune kütlesindeki maksimum izin verilen kayıp değeri %14' aşmamalıdır. Optimum kireç oranının belirlenmesi için hazırlanan %8 oranında kireç

içeren karışımda, 11. ıslanma-kuruma periyodunda %14'luk kütle kaybı oluşmuş ve son ıslanma-kuruma periyodundaki kayıplar %14' çok az aşmıştır. Bu sebeple, doğal malzeme için optimum kireç oranı %8 olarak belirlenmiştir.

Laboratuara getirilen doğal malzeme havada kurutulduktan sonra plastisiteden dolayı topaklar halinde olduğundan ve deneyler için homojen karışımlar hazırlamak gerektiğinden numunenin tane özelliklerini bozmayacak Şekilde bu topaklar lastik tokmakla ezilerek ufalanmıştır. Her bir materyalden Tablo 6'de verilen oranlarda olacak Şekilde ezilmiş ve ufalanmış kil zemine perlit ve kireç kombinasyonu katılarak hazırlanan karışımlar deneylere hazır hale getirilmiştir. Üretilen karışımların diğer geoteknik özellikleri başka araştırmalarda sunulmuştur [23, 24]. Tüm deney karışımlarına verilen isimlendirmeler Tablo 6'da görülmektedir. Bu Tablo'da görülen karışımları oluşturacak



Şekil 5. Optimum kireç oranının ASTM D 6276'ya göre tespiti [21]
(Determination of optimum lime ratio according to ASTM D 6276 [21])



Şekil 6. %8 kireçli numunelerin serbest basınç dayanımlarının zamana bağlı değişimi
(Time dependent variation of unconfined compressive strength of samples with 8% lime)

Tablo 6. Üretilen karışımlara ait isimlendirmeler (Nomenclature of prepared mixtures)

Materyallerin deney karışımlarındaki oranları			Notasyon
Doğal malzeme	Perlit		
%100	%0		SP0
%90	%10		SP10
%80	%20		SP20
%70	%30		SP30
%60	%40		SP40
%50	%50		SP50
Doğal malzeme	Perlit	Sönmüş kireç	Notasyon
%100	%0		SKP0
%90	%10		SKP10
%80	%20	Her bir karışıma kuru ağırlılığının %8'i kadar	SKP20
%70	%30	kireç katılmıştır.	SKP30
%60	%40		SKP40
%50	%50		SKP50

olan üç materyal (kil zemin, perlit ve kireç) etüvde değil de havada kurutulduğundan belli bir miktar su içermektedir (Yaklaşık doğal malzeme %10,54, perlit %0,41 ve kireç %0,49 su içeriğine sahiptir). Bu yüzden doğal malzeme ve perlit oranları, toplam karışımdaki kuru ağırlıkça yüzdeleri olduğundan sahip oldukları su içerikleri göz önünde tutularak istenen oranının sağlaması için kullanılacak ıslak (nemli) doğal malzeme ve perlit miktarları hesaplanmıştır.

Geçirimsizlik deneyi, için gereken numuneler optimum su içeriğinde maksimum kuru yoğunluğa sahip olacak şekilde hazırlanacağından her bir karışımın ilk önce standart kompaksiyon deneyi ile optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunlukları belirlenmiştir. Optimum su içerikleri belirlenen karışımlar, bu su içeriğine sahip olacak şekilde nemlendirildikten sonra geçirimsizlik deneyleri için ise hazırlanan çapı 100 mm ve yüksekliği 130 mm olan kalıp için standart Proktor enerjisi ile sıkıştırılmıştır. Zemin dolu bu kalıplar 28 günlük kürden sonra doğgun hale getirmek için nem odasında plastik kovalara yerleştirilerek düşen seviyeli geçirimsizlik deneylerine hazır hale getirilmiştir.

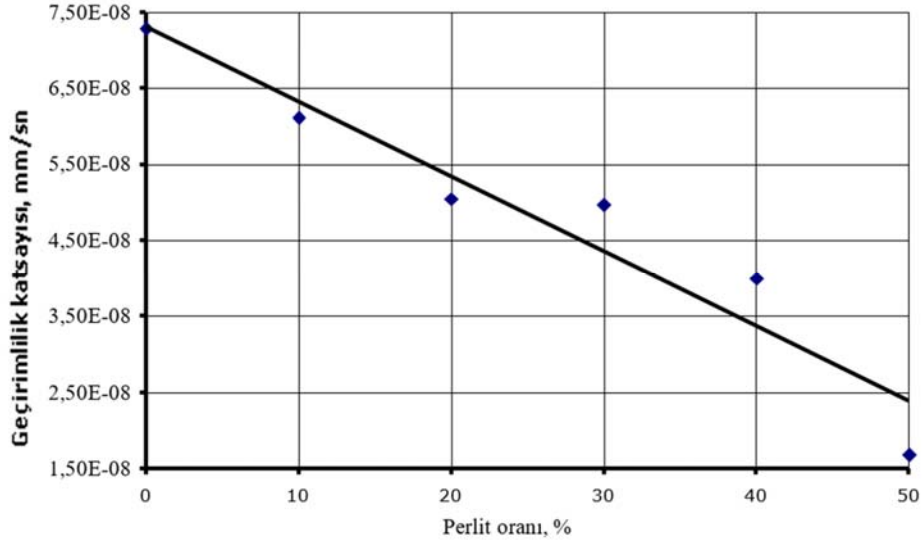
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Zemin boşluklu bir ortam olup boşlukları birbirine bağlıdır. Su zemin ortamında boşluklarda hareketsiz (durgun) durumda bulunabildiği gibi, birbirine bağlı boşluklardan geçerek (hareketli yer altı su durumu) akabilir [25]. Zemin içindeki serbest suyun akımı hidrolik yasalarına uygun olarak meydana gelir. Zemin içerisinde meydana gelen akımla bir su borusu içinde meydana gelen akım arasındaki fark, zemin içinde akan suyun tam kesit yerine sadece zemin boşluklarından akıyor olmasıdır. Zemin içindeki serbest suyun akımı Darcy yasası olarak bilinen koşula uygun olarak hareket etmektedir. Genel olarak geçirimsizlik problemlerinde su miktarı veya debisi bilinmek istenen değerlerdir. Killi zeminlerin geçirgenliği kil-su sisteminin karmaşık ilişkisi yüzünden çok fazla değişkenin etkisindedir. Örneğin örselenmemiş bir kilin geçirimsizlik katsayısı yoğrulma

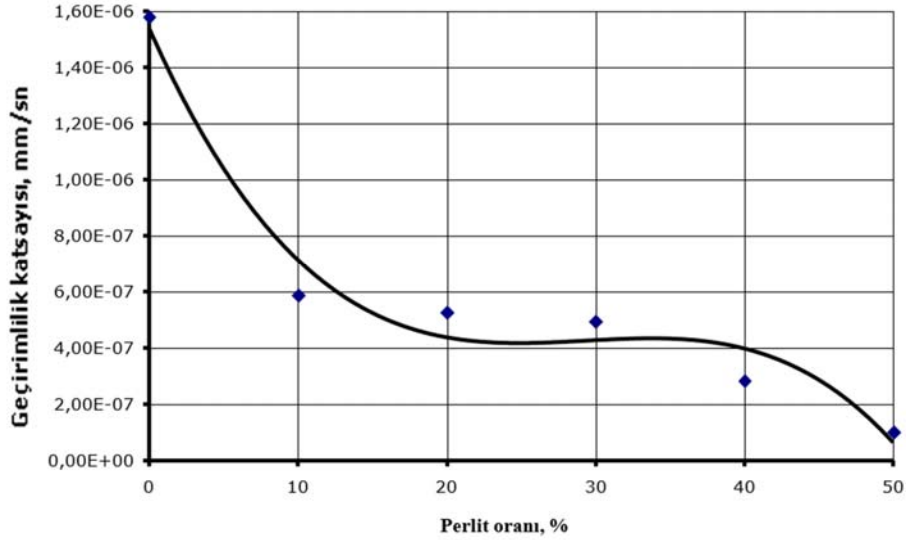
sonucu 4 kat azalabilmektedir. Suyun tanelere elektrokinetik bağlantısı, kil boşluklarındaki suyun yüksek viskozitede bulunması, zemin dokusunun apraşıklılığı nedeniyle akım yönlerinin tariflenememesi ve boşluk geometrisinin kolloidlerin kümelenmesi sonucu eşit olmayan dağılımı vb. nedenler kilde geçirimsizliğin basitçe tahmin edilemeyen bir katsayı olması sonucunu getirmektedir. Kil yapısının konsolidasyon özelliği nedeniyle boşluk hacminde değişimler olmakta ve geçirimsizlik katsayısını etkilemektedir. Sonuç olarak geçirimsizlik zeminin özelliklerine (boşluk oranı, kuru yoğunluk, plastisite vb.) bağlı olarak büyük bir aralıkta değişim gösterebilmektedir.

Al Rawi vd. [26] kumla iyileştirilen kohezyonlu zeminlerin geçirimsizlik katsayısında artış gözlemiştir. Mollamahmutoğlu ve Avcı [27] ise, cüruf esaslı çok ince imento ile yüksek plastisiteli kil zeminin geçirimsizliğinin azaldığını bulmuşlardır. Kil zemine perlit ve kireç katılarak hazırlanan SP ve SKP karışımlarının geçirimsizlik katsayıları üzerinde, kıvam limitleri, su içerikleri, kuru yoğunlukları ve boşluk oranları gibi parametrelerin etkisi bulunmaktadır. Doğal zemin ve perlit karışımlarının, perlit oranına bağlı olarak geçirimsizlik katsayılarındaki değişim Şekil 7'de görülmektedir. Artan perlit oranına bağlı olarak geçirimsizlik katsayısında azalma meydana gelmiş ve %50 perlit katılı karışımın geçirimsizlik katsayısı doğal kil zeminin yaklaşık üç katı daha az olmuştur. Erdem vd. [28], Erzincan perlitlerinin, katılı imento imalatında kullanmaya uygun puzolanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Perlit kum boyutunda olmasına rağmen puzolanik özelliği sebebiyle, cüruf esaslı çok ince çimentoya benzer şekilde geçirimsizlikte azalmaya sebep olmaktadır.

Kil zemin, perlit ve kireç karışımlarının, perlit oranına bağlı olarak geçirimsizlik katsayılarındaki değişim Şekil 8'de görülmektedir. Kil zemin ve sadece kireç karışımın geçirimsizlik katsayısı, doğal zemine göre 25 kata kadar artış göstermiştir. Başka bir deyişle, sadece kireç kullanılarak yapılan stabilizasyon işleminin, zeminin geçirimsizliğinde ciddi



Şekil 7. SP karışımlarının geçirimsizlik katsayıları (Permeability coefficients of SP samples)



Şekil 8. SKP karışımlarının geçirimsizlik katsayıları (Permeability coefficients of SKP samples)

miktarlarda artışa sebep olmaktadır. Kil zeminlerin, kireçle stabilizasyonunda önemli sonuçlarından biri flokülleşme olup kalsiyum ve magnezyum iyonları absorbe su tabakasının incelmesine ve topaklı bir yapının oluşmasına sebep olmaktadır. Flokülleşme sonucu oluşan topakların arasında daha büyük boşluklar olduğundan zeminin geçirimsizliği, kireç stabilizasyonu ile ciddi oranda artmaktadır. Doğal zemin ve perlit karışımlarına benzer şekilde; doğal zemin, kireç ve perlit karışımlarında da artan perlit oranı ile permeabilite katsayılarında azalma sözü konusu olmuştur. %50 perlit ve kireç karışımının geçirimsizlik katsayısı, sadece kireç içeren karışıma göre yaklaşık 15 kat azalmıştır. Yani kireçle stabilize edilen zeminlerde ortaya çıkan geçirimsizlik problemi, perlit gibi puzolanik katkı ile aşılabilir. Benzer bir çalışmada, Alrubaye vd. [29] kireç ve puzolanik katkı olarak silis dumanı kullanarak yaptıkları stabilizasyon çalışmasında artan silis dumanı oranının kaolin kilinin geçirimsizliğini azalttığını belirlemiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Zayıf zeminlerin mühendislik özelliklerini ıslahında mekanik ve kimyasal iyileşmeyi sağlayan yöntemlerin beraber kullanımı en ekonomik ve en etkili çözümler olmaktadır. Bu çalışmada, smektit grubu kil mineralleri içeren yüksek plastisiteli doğal zemin stabilizasyonunda %0, %10, %20, %30, %40, %50 perlit ve %8 kireç (sadece SKP karışımlarında) kullanılarak 6 tane SP ile 6 tane SKP karışım hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Böylece perlit oranına bağlı olarak, karışımların geçirimsizlik özelliklerinin nasıl değişim gösterdiği araştırılmıştır. Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Puzolanik katkı olarak perlit kullanımı, doğal zemin ve perlit karışımlarının geçirimsizliğini artıran perlit oranıyla birlikte azaltmaktadır. Doğal zemin, kireç ve perlit karışımlarının

geirirnililiğini, artan perlit oranıyla orantılı azalmaktadır. %10 perlit oranına kadar geirirnililik önemli miktarda azalmakta olurken bu oranının ötesinde ilave edilen perlitin geirirnililiğe etkisi daha az olmaktadır. Yüksek plastisiteli kil zemin ile kireç karışımlarının geirirnililiğinde, kil zemine göre 25 kata varan artış olabilmektedir. Yani, yüksek plastisiteli zeminlerin kireçle stabilizasyonu geirirnililikte ciddi artışlara sebep olmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Tunç A., Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, Ankara, 2002.
2. Lambe P.C., Khosla N.P., Jayaratne N.N., Soil Stabilization in Pavement Structures, Report No. 232411-88-1, Transportation Studies Research, North Carolina, 1990.
3. Kota P.B.V., Hazlett D., Perrin L., Sulfate-Bearing Soils: Problems with Calcium Based Stabilizers, Record No. 1546, Transportation Research Board, Washington, 1996.
4. Hausmann M.R., Engineering Principles of Ground Modification, McGraw-Hill, New York, 1990.
5. McCallister L.D., Petry T.M., Property Changes in Lime Treated Expansive Clays under Continuous Leaching, Report No. DACA 39-88-M-0550, US Army Corps of Engineers, Washington, 1990.
6. Puppala A.J., Hanchanloet S., Evaluation of a New Chemical Treatment Method on Strength and Resilient Properties of a Cohesive Soil, Record No. 990389, Transportation Research Board, Washington, 1999.
7. Fırat S., Cmert A., Curing time effects on CBR of stabilized kaoline with fly ash, lime and cement, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 26 (4), 720-730, 2011.
8. ztrk Y.Z., nsal N., Akbaş S.O., Assessment of the swelling and lime stabilization potential of Glbaşı (Ankara) residential area clays, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (2), 309-318, 2015.
9. Kumar B.R.P., Sharma R.S., Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130 (7), 764-767, 2004.
10. Sivapullaiah P.V., Lakshmikantha H., Lime stabilized illite as a liner, Ground Improvement, 9 (1), 39-45, 2005.
11. Wong L.S., Hashim R., Ali F.H., Strength and Permeability of Stabilized Peat Soil, Journal of Applied Sciences, 8 (21), 3986-3990, 2008.
12. ASTM D 934, Standard Practices for Identification of Crystalline Compounds in Water-Formed Deposits, ASTM, Pennsylvania, 2003.
13. ASTM D 5856, Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid Wall Compaction-Mold Permeameter, ASTM, Pennsylvania, 2007.
14. ASTM D 4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM, Pennsylvania, 2010.
15. ASTM D 854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM, Pennsylvania, 2010.
16. ASTM D 698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM, Pennsylvania, 2007.
17. Skempton A.W., The Colloidal Activity of Clays, 3rd Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation, Zurich University, Switzerland, 57-61, 1953.
18. Coduto D.P., Geoteknik Mhendisliği İlkeler ve Uygulamalar, Gazi Kitapevi, Ankara, 2006.
19. ASTM D 2974, Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils, ASTM, Pennsylvania, 2007.
20. TS EN 1744-1, Agregaların Kimyasal zellikleri İçin Deneyler Blm 1: Kimyasal Analiz, Trk Standartları Enstits, Ankara, 2000.
21. ASTM D 6276, Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization, ASTM, Pennsylvania, 2006.
22. U.S. Army Corps. Of Eng., Guidelines on Ground Improvement for Structures and Facilities, Research No. 20314-1000, Department of the Army, Washington, 2003.
23. Calık U., Sadoglu E., Classification, shear strength, and durability of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite, Natural hazards 71 (3), 1289-1303, 2014.
24. Calık U., Sadoglu E., Engineering properties of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite, Geomechanics and Engineering, 6 (4), 403-418, 2014.
25. Uzuner B.A., Czml Problemlerle Temel Zemin Mekaniği, 10. Basım, Teknik Yayınevi, Ankara, 2016.
26. Al Rawi O.S., Assaf M.N., Hussein N.M., Effect of sand additives on the engineering properties of fine grained soils, ARP Journal of Engineering and Applied Sciences, 13 (9), 3197-3206, 2018.
27. Mollamahmutoğlu M., Avci E., Engineering properties of slag-based superfine cement-stabilized clayey soil, ACI Materials Journal, 115 (4), 541-548, 2018.
28. Erdem T.K., Meral C., Tokyay M., Erdogan T.Y., Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements, Cement & Concrete Composites, 29, 13-21, 2007.
29. Alrubaye A.J., Hasan M., Fattah M.Y., Effects of using silica fume and lime in the treatment of kaolin soft clay, Geomechanics and Engineering, 14 (3), 247-255, 2018.

