

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ATIKSU ÇAMURU KÜLÜ VE KİREÇLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERİN
MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa Fatih KÜÇÜK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

ŞUBAT 2023

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ATIKSU ÇAMURU KÜLÜ VE KİREÇLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERİN
MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa Fatih KÜÇÜK
(201282005)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet KUVAT

ŞUBAT 2023

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ATIKSU ÇAMURU KÜLÜ VE KİREÇLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERİN
MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa Fatih KÜÇÜK
(201282005)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

İstanbul Gedik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat
Mühendisliğinde Yapılan Bu Tez Çalışması, Geoteknik Anabilim Dalı Yüksek
Lisans Derecesi Gereksinimlerini Sağlamaktadır.

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet KUVAT

ŞUBAT 2023



T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi

Enstitümüz, İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı 201282005 numaralı öğrencisi Mustafa Fatih KÜÇÜK'ün “Atıksu çamuru külü ve kireçle iyileştirilmiş zeminlerin mukavemet özelliklerinin incelenmesi” adlı tez çalışması 09/02/2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aşağıdaki jüri tarafından *Oy Birliği ile Yüksek Lisans* tezi olarak *Kabul* edilmiştir.

Öğretim Üyesi Adı Soyadı

Jüri Onay Tarihi : 09/02/2023

- 1) Tez Danışmanı:** Dr. Öğr. Üyesi Ahmet KUVAT
- 2) Jüri Üyesi:** Doç. Dr. Redvan GHASEMLOUNIA
- 3) Jüri Üyesi:** Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper KAMILOĞLU

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Atıksu çamuru külü ve kireçle iyileştirilmiş zeminlerin mukavemet özelliklerinin incelenmesi” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadar ki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’ da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim (09/02/2023).

Mustafa Fatih KÜÇÜK



Eşime ve Çocuklarıma,



ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında bilgisine ve tecrübesine her zaman güvendiğim ve inandığım gerek zaman ve imkân açısından gerekse laboratuvar çalışmaları esnasında özveriyle desteğini, değerli bilgi ve tavsiyeleriyle katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Ahmet KUVAT' a içtenlikle en kalbi teşekkürlerimi sunuyorum.

Değerli katılımlarını esirgemeyen, tez izleme komitesi üyeleri hocalarım, Sayın Doç. Dr. Redvan GHASEMLOUNIA ve Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper KAMILOĞLU'na katılım, destek ve değerli yönlendirmelerinden dolayı sonsuz teşekkür ederim.

Hayatımın her evresinde olduğu gibi bu tez çalışmam boyunca da bana her türlü desteklerini, hoşgörülerini ve sonsuz sevgilerini esirgemeyen aileme ve sevgili eşim Öznur KÜÇÜK'e çok teşekkür ederim.

Subat 2023

Mustafa Fatih KÜÇÜK
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel.....	1
1.2 Çalışma Konusu.....	3
1.3 Tezin Amacı ve Kapsamı.....	4
1.4 Zeminlerin Güçlendirilmesi.....	5
1.5 Zeminlerin İyileştirilmesi.....	6
1.5.1 Kireç ile zemin iyileştirme.....	10
1.6 Literatür Araştırması.....	13
2. MATERYAL VE YÖNTEMLER	17
2.1 Materyal.....	17
2.1.1 Saf zemin.....	18
2.1.2 Kireç.....	20
2.1.3 Atıksu çamuru külü (AÇK).....	21
2.2 Yöntemler.....	22
2.2.1 Deneylerde dikkate alınan standartlar.....	22
2.2.2 Kıvım limitlerinin belirlenmesi.....	22
2.2.3 Öğütme işlemi.....	23
2.2.4 Kompaksiyon deneyi.....	24
2.2.5 Numunelerin hazırlanması.....	25
2.2.6 Serbest basınç deneyi (UCS).....	28
2.2.7 Ultrasonik titreşim hızı deneyi (UPV).....	30
3. BULGULAR VE İRDELEME	31
3.1 Kompaksiyon Deneyleri.....	31
3.2 Serbest Basınç Deneyleri.....	32
3.3 Ultrasonik Titreşim Hızı Deneyleri.....	36
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	38
4.1 Sonuç.....	38
4.2 Öneriler.....	39
KAYNAKLAR	40
ÖZGEÇMİŞ	43

KISALTMALAR

AÇK	: Atıksu Çamuru Külü
YASS	: Yeraltı Su Seviyesi
CH	: Yüksek Plastisiteli Kil
CI	: Orta Plastisiteli Kil
CL	: Düşük Plastisiteli Kil
CBR	: California Rulman Oranı
UCS	: Serbest Basınç Deneyi
UPV	: Ultrasonik Titreşim Hızı
E₅₀	: Elastisite Modülü
ε_f	: Şekil Değişirme
w_{opt}	: Optimum Su İçeriği
ρ_{k,max}	: Maksimum Kuru Yoğunluk
V_{sp}	: Standart Proctor Kalıp Hacmi
ΣE_{sp}	: Standart Proctor Deneyinde Uygulanan Toplam Enerji
E_v	: Standart Proctor Deneyinde Birim Hacime Uygulanan Enerji
V_n	: Numune Kalıbı Hacmi
E_n	: Numuneleri sıkıştırmak için gereken Standart Proctor Enerjisi
E₁	: Standart Proctor Tokmağındaki bir vuruşa denk gelen enerji
T	: Numunelerin Standart Proctora göre Sıkıştırmak için Gerekli Vuruş Sayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Deney Numuneleri Notasyonları	17
Çizelge 2.2: Saf Zemine Ait Temel Fiziksel Özellikler	19
Çizelge 2.3: Söndürülmüş Toz Kirece Ait Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	20
Çizelge 2.4: Atıksu Çamuru Külüne Ait Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	21
Çizelge 2.5: Deneyler ve İlgili ASTM Standartları.....	22



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Alt Sınıfları	8
Şekil 1.2: a) Düşey Dren Yöntemi, b) Zemin Dondurma c) Fore Kazık	9
Şekil 1.3: Zemin Farklılığına Göre Kireç İçeriğinin Etkisi	11
Şekil 1.4: Kireç ile Zemin İyileştirme Aşamaları	12
Şekil 1.5: Karayolunda Kireç ile Zemin İyileştirme	13
Şekil 2.1: Doğal Malzemenin Alındığı Yerin Konumu	18
Şekil 2.2: Mastersizer Hydro 3000 Lazer Kırınım Cihazı	19
Şekil 2.3: Doğal Malzemenin Dane Boyutu Dağılım Eğrisi	20
Şekil 2.4: Söndürülmüş Toz Kirece Ait Dane Boyutu Dağılım Eğrisi	21
Şekil 2.5: Atıksu Çamuru Külüne Ait Dane Boyutu Dağılım Eğrisi	22
Şekil 2.6: Casagrande Deney Aleti	23
Şekil 2.7: a) Doğal Zemin, b) İri Çeneli Kırıcı	24
Şekil 2.8: a) İnce Malzeme Değirmeni, (b) Öğütme İşlemi Tamamlanmış Saf Zemin	24
Şekil 2.9: Karışım Hazırlama Mikseri	25
Şekil 2.10: a) Numunelerin Hazırlanmasında Kullanılan Kalıp, b) Kalıbın Bileşenleri	26
Şekil 2.11: Numuneleri Sıkıştırma İşleminde Kullanılan Aparat ve Standart Proctor Tokmağı	27
Şekil 2.12: Serbest Basınç Deneyleri İçin Hazırlanan Tipik Numune	28
Şekil 2.13: Desikatörde Kür'e Maruz Bırakılan Numuneler	28
Şekil 2.14: UTEST Marka Bilgisayar Kontrollü Serbest Basınç Deney Aleti	29
Şekil 2.15: Serbest Basınç Deneyi Sonrası Kırılmış Zemin Numunesi	29
Şekil 2.16: Proseq Marka Ultrasonik Titreşim Deney Aleti	30
Şekil 3.1: Katkı Türü ve Oranına Bağlı Olarak Optimum Su İçeriği Değişimi	32
Şekil 3.2: Katkı Türü ve Oranına Bağlı Olarak Maksimum Kuru Yoğunluk Değişimi	32
Şekil 3.3: Kür Süresine Bağlı Olarak UCS Değerlerinin Değişimi	33
Şekil 3.4: 7 Gün Kür İçin UCS Deney Sonuçları	33
Şekil 3.5: 14 Gün Kür İçin UCS Deney Sonuçları	34
Şekil 3.6: 28 Gün Kür İçin UCS Deney Sonuçları	34
Şekil 3.7: E_{50} Değerinin Kür Süresi ve Katkı Türüne Göre Değişimi	35
Şekil 3.8: ε_f Değerinin Kür Süresi ve Katkı Türüne Göre Değişimi	36
Şekil 3.9: UPV Hızlarının Kür Süresi ve Katkı Türüne Göre Değişimi	37

ATIKSU ÇAMURU KÜLÜ VE KİREÇLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERİN MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Son yıllarda hızlı kentleşmenin bir sonucu olarak ortaya çıkan büyük miktarlardaki atıksuların arıtılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Atıksu arıtımı sonucu ortaya çıkan çamurun bertaraf edilmesi için de oldukça farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden biride, çamurun kurutulduktan sonra yakılması işlemidir. Bu işlem atık hacmini önemli bir oranda azaltsada, yakma işlemi sonucu ortaya çıkan külün de bertaraf edilmesi gerekliliği ortaya çıkarmıştır. Bu tez kapsamında atıksu çamuru külü (AÇK), kireç ve ikisinin birlikte kullanıldığı farklı senaryolar ile iyileştirilmiş kil zeminlerin kür süresine bağlı olarak mukavemet, rijitlik ve sıkışma özellikleri incelenmesi tezin asıl amacını oluşturmaktadır.

Çalışma kapsamında birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre yüksek plastisiteli kil olan doğal zemine toplam katkı oranı %10 olacak şekilde AÇK ve kirecin tek başına ve her ikisinin farklı oranlarda beraber kullanıldığı numuneler hazırlanmıştır. Serbest basınç ve ultrasonik titreşim deneyleri için kür süreleri 7, 14, 28, 35, 42 ve 49 gün olarak belirlenmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda en yüksek serbest basınç dayanımı, rijitlik ve ultrasonik hız ölçümleri %7.5 kireç ve %2.5 AÇK içeren (ZK75A25) numunelerden elde edilmiştir. ZK75A25 numunelerinin 28 gün kür süresinden itibaren daha yüksek dayanım kazandığı belirlenmiştir. Numunelerde kireç içeriği arttıkça daha gevrek bir kırılma olduğu görülmüştür. Deneysel bulgular ışığında AÇK'nın tek başına kullanımı doğal zeminin mukavemetini artırsa da kireçle beraber kullanıldığında oldukça etkin bir stabilizasyon malzemesi olabileceği sonucuna varılmıştır. Böylece her yıl binlerce ton ortaya çıkan AÇK'nın problemlili zeminlerin stabilizasyon malzemesi olarak kullanılması ile etkili bir şekilde geri dönüşümünün sağlanabileceği çıkarımı yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Zemin iyileştirme, Kireç, Atıksu çamuru külü, serbest basınç mukavemeti, ultrasonik titreşim hızı*

INVESTIGATION OF STRENGTH PROPERTIES OF WASTEWATER SLUDGE ASH AND LIME STABILIZED SOILS

ABSTRACT

In recent years, the necessity of treating large amounts of wastewater, which has emerged as a result of rapid urbanization, has emerged. Quite different methods are applied for the disposal of sludge resulting from wastewater treatment. One of these methods is the process of burning the sludge after drying. Although this process significantly reduced the waste volume, it also revealed the necessity to dispose of the ash generated as a result of the incineration process. In this thesis, the main purpose of the thesis is to examine the strength, stiffness and compaction properties of wastewater sludge ash (SSA), lime and clay soils improved with different scenarios where both are used together, depending on the curing time.

Within the scope of the study, specimens were prepared by using SSA and lime alone and both of them together at different ratios with a total admixture rate of 10% to the natural soil, which is a high plasticity clay according to the unified soil classification system. Curing times for unconfined compression (UCS) and ultrasonic vibration tests (UPV) were determined as 7, 14, 28, 35, 42 and 49 days.

As a result of the experiments, the highest unconfined compressive strength, stiffness and ultrasonic velocity measurements were obtained from the specimens containing 7.5% lime and 2.5% SSA (ZK75A25). It was determined that ZK75A25 specimens gained higher strength after 28 days curing period. It was observed that a more brittle fracture occurred as the lime content increased in the specimens. According to the experimental findings, it was concluded that although the use of SSA alone increases the strength of the natural soil, it can be a very effective stabilization material when used together with lime. Thus, it is concluded that thousands of tons of SSA generated every year can be effectively recycled by using it in the stabilization material of problematic soils.

Keywords: *Soil improvement, Lime, Sewage sludge ash, Unconfined compression strength, Ultrasonic pulse velocity*

1. GİRİŞ

1.1 Genel

Literatürde yapılan araştırmalar incelendiği zaman getiğimiz birkaç yılla birlikte çevreye yönelik yapılan projelerin sayısal olarak arttığı sonucuna varılmıştır. Bu durumun nedenleri araştırıldığı zaman kentleşme sorunu ön plana çıkmıştır. Ana faktörlerden olan kentleşmeyle beraber nüfus artışının hızlanarak ilerlemesinin getirdiği sonuçlar arasında atıksu çamuru büyük bir problem oluşturmaktadır [1].

Arıtılma işlemi tamamlanmış olan suyun ve çamurun uzaklaştırılabilmesi için kullanılacak olan yönetmelikler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır [1].

- T.C. evre ve şehircilik Bakanlığı Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik
- Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik
- Evsel ve Kentsel Arıtma amurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik

Atıksu amurlarının uzaklaştırılma sürecinde vrenin ve o vrede yaşayan bireylerin zarar görmemesi için kullanılacak yöntemin ve iç planındaki her detayın dikkatle oluşturulması gerekmektedir [1].

Literatürde yapılan araştırmalar incelendiği zaman istatıksel olarak atıksu çamur külünün (AK) her geçen gün arttığı grlmektedir [2]. Fakat bu durumun yanı sıra ortaya çıkan atıksu çamur külünün kullanıldığı araştırmaların niceliği yeterli değildir [3]. Literatürde yapılan araştırmalara bakıldığı zaman atıksu çamuruna kireç ilave edildiğinde serbest basınç kuvvet (UCS) değerinin 3 ile 7 kat arasında artığı bulgusuna erişilmiştir. Bu duruma ek olarak toprağın şişme özelliğinde azalma meydana geldiği görülmüştür [3].

Literatürde yapılan araştırmalar incelendiği zaman günümüzde büyüyen kentleşme, sanayileşme ve artan nüfusuyla birlikte zeminlerin dayanıklılığında azalma olduğu bulgusuna erişilmiştir [4]. Bu doğrultuda yapılan çalışmalara bakıldığı zaman

mühendislik araştırmalarının zemin güçlendirmeye doğru kaydığı sonucuna ulaşılmıştır. Dolayısıyla herhangi bir projeye başlamadan önce zeminin dikkatlice incelenmesi gerekmektedir. İncelenen zemin hakkında üç farklı karar verilebileceği yapılan araştırmaların sonuçlarında yer almaktadır. Bu kararlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır [4].

- İstenilen özelliklere sahip olmayan zemini kabul etme
- İstenilen özelliklere sahip olmayan zemini atıp yerine uygun zemini yerleştirme
- İstenilen özelliklere sahip olmayan zemini iyileştirme

Yukarıda yer alan üç farklı yöntemi değerlendirirken çeşitli faktörlerin ön plana çıktığı görölmektedir. İstenilen özelliklere sahip olmayan zemini kabul etme durumu değerlendirilirken proje sonucunda oluşacak olan yapının zeminin güçsüzlüğüne dayanıp dayanamayacağı durumu en çok etkileyen faktörler arasında yer almaktadır. Fakat yapılan araştırmaların sonuçlarına bakıldığı zaman bu tür oluşumların sonucunda sürekli olarak onarım masrafı oluştuğu görölmektedir [4]. İkinci seçenek olan istenilen özelliklere sahip olmayan zemini atıp yerine uygun zemini yerleştirme durumu düşünöldüğü zaman maliyet olarak çok yüksek olduğu bulgusuna erişilmiştir. Bu duruma neden olan etkiler arasında depolama, hafriyat yapılması ve sıkıştırma işlemine ihtiyaç duyulmasıdır. Dolayısıyla istenilen özelliklere sahip olmayan zemini atıp yerine uygun zemini yerleştirmede hem yüksek maliyet hem de zaman kaybı oluşmaktadır. Bir diğer karar olan istenilen özelliklere sahip olmayan zemini iyileştirme durumunda zemin ıslah teknikleri kullanılmaktadır [4; 5].

Zemin iyileştirmesi kelimesine bakıldığı zaman ölkemizde aynı zamanda zemin stabilizasyonu olarak da kullanıldığı bulgusuna erişilmiştir. Fakat bu durumun tam olarak doğru olduğu kabul edilememektedir [6]. Çünkü iyileştirme kelimesi yoğunluk, geçirimsizlik, ısıl iletkenlik ve şişmeyle büzölme yeteneğini kapsamaktadır. Stabilizasyon teriminin kapsamına bakıldığı zaman ise genel olarak özelliklerin istenen yönde değiştirilmesi ve sıvılaşma riskinin giderilmesini kapsamaktadır [7].

Yapılan araştırmalara göre zemin iyileştirilmesinde kullanılan metotlardan mekanik olanların getirdiği zorluklar olduğu sonucuna varılmıştır. Bu zorluklara bakıldığı zaman ön plana teknolojik altyapının ve maliyetin çıktığı görölmektedir. Dolayısıyla

mekanik iyileştirmelerin mümkün olmadığı durumlarda zeminin iyileştirilebilmesi için kimyasal yöntemlere başvurulması gerektiği bulgusuna erişilmiştir.

Kimyasal iyileştirme sürecinde kullanılan maddeler incelendiği zaman kireç, çimento, uçucu kül ve bitümlü malzemelerin ön plana çıktığı sonucuna erişilmiştir [8]. Literatürdeki çalışmalara bakıldığı zaman kirecin bilinen en eski iyileştirme maddesi olduğu bulgusuna erişilmiştir [9]. Kireç ile zemin iyileştirme yöntemi incelendiği zaman iki farklı basamaktan oluştuğu sonucuna varılmıştır [8]. Henüz sönmemiş olan kirecin suyla tepkimeye girmesi sonucunda kalsiyum oksit ağırlığının %32'si kadar su emdiği sonucuna erişilmiştir. Daha sonrasında hidrasyon meydana gelmektedir ve bu süreçte kirecin hacmi artarak sondaj kuyusunun kenarlarında 1250 ile 1400 kPa arasında yüksek bir basınç oluşturulmaktadır. Böylelikle zeminin radyel konsolidasyonu oluşmaktadır. Daha sonrasında hacimsel artış engellenmez ise % 96'lık bir değişimin oluşacağı bulgusuna erişilmiştir [8].

Bu proje kapsamında atıksu çamuru külü, kireç ve ikisinin birlikte kullanıldığı farklı senaryolarla iyileştirilmiş kil zeminlerin mekanik, fiziksel ve mikro yapısal özellikleri incelenerek; kür süresine bağlı mukavemet, rijitlik ve sıkışma özellikleri ele alınmıştır. Ayrıca; atıksu çamuru külünün depolamak yerine mühendislik alanında zemin güçlendirilmesi gibi uygulamalarda tekrar kullanılması hedeflenmektedir. Böylelikle maliyetin düşürülmesi, atıksu çamurunun geri dönüşümü ve sürdürülebilirliğin artırılmasına önemli derecede katkı sağlanması hedeflenmektedir.

1.2 Çalışma Konusu

Geçtiğimiz yüzyılda aşırı kentleşmenin bir sonucu olarak kentsel atıkların oldukça yüksek miktarlara ulaştığıdır. Bu atıkların önemli bir oranını atıksu arıtma tesislerinde ortaya çıkmaktadır. Atıksu çamuru adı verilen bu atıkların yönetimi önemli bir problem oluşturmuş ve bertaraf edilmesi için farklı yöntemler zaman içerisinde geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden en yaygın olanı çamurun susuzlaştırılmasından sonra yakılması işlemidir. Böylece atıksu çamuru'nun hacmi önemli derecede azalsa da yine de ortaya çıkan külün de bertaraf edilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında atıksu çamuru külünün (AÇK) düşük mukavemetli bir başka deyişle zayıf zeminlerin iyileştirilmesine yönelik kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu kapsamda AÇK tek başına ve kireçle beraber kullanıldığında nasıl bir iyileştirme performansı göstereceği deneysel olarak irdelenmiştir. Çalışmanın ilk seri deneylerinde, AÇK ve kireç içeren zemin karışımlarının sıkışma özellikleri incelenmiştir. Bu aşamadan sonra, farklı oranlarda AÇK ve kireç içeren numunelerden serbest basınç deneyleri için numuneler oluşturulup belirlenen kür süreleri sonrasında numuneler ile ultrasonik dalga hızı ve serbest basınç mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Böylece AÇK'nın zemin iyileştirmesi uygulamalarında rijitlik ve mukavemet üzerindeki etkinliği hem tahribatlı hem de tahribatsız yöntemlerle incelenmiştir. Sonuç olarak bu tez çalışması kapsamında AÇK'nın zemin iyileştirilmesi uygulamalarında daha verimli kullanılması ve böylece heryıl ortaya çıkan binlerce ton AÇK'nın etkili bir şekilde bertaraf edilmesi hedefine ulaşılacaktır.

1.3 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın temel amacı, atıksu çamuru külü, kireç ve her iki katkının beraber kullanılması ile iyileştirilen killi zeminlerin kür süresine bağlı mukavemet, rijitlik ve sıkışma özelliklerinin tahribatlı ve tahribatsız yöntemlerle belirlenmesi ve tüm katkı malzemelerinin farklı oranlarının etkisinin ortaya konulmasıdır.

Mevcut literatüre göre AÇK'nın zemin iyileştirmesi amacıyla kullanılabilirliğine yönelik çalışmalar olsada, kireç ile beraber kullanılarak rijitlik özelliklerinin incelenmesi hususunda eksikliğin olduğu görülmüştür. Bu kapsamda yapılacak olan tez çalışmamda;

- a) Doğal zeminin geoteknik özelliklerinin incelenmesi, AÇK ve kirecin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi;
- b) Farklı oranlarda AÇK ve kireç içeren karışımların optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluklarının standart Proctor deneyi ile belirlenmesi;
- c) Farklı oranlarda atıksu çamuru külü, kireç ve bunların farklı kombinasyonları oluşturularak zemin iyileştirmesinin yapılması farklı sürelerde desikatörde küre maruz bırakıldıktan sonra serbest basınç dayanımı ve ultrasonik titreşim hızlarına etkisinin araştırılması;

hedeflenmektedir. Böylelikle her yıl milyonlarca ton doğaya bırakılan atıksu çamuru külünün etkili bir biçimde geri dönüşüm malzemesi olarak çözüm üretebileceği düşünülmektedir.

Bu tez çalışması Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Geoteknik ve Ulaştırma Laboratuvarında deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında; Tokat ili Erbaa ilçesinden temin edilen yüksek plastisiteli kil zemin, Erbaa Bayraktar Kireç Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından üretilen SKK80-T söndürülmüş toz kalker kireci kullanılmıştır.

1.4 Zeminlerin Güçlendirilmesi

İnşaat sektörü dünya genelinde her geçen gün gelişerek daha ileri seviyelere çıkmaktadır. Bu doğrultuda Türkiye’de inşaat sektöründe gelişen yöntemleri kullanmaktadır [10]. Literatürde yapılan çalışmaların sonuçlarına bakıldığı zaman inşaat mühendisliğinin zeminin güçlendirmesine yönelik yapılan araştırmaların büyük önem kazandığı bulgusuna erişilmiştir [10; 11].

Literatürde yapılan araştırmalara göre zemine yönelik çeşitli tehlikeler olduğu görülmektedir. Bu tehlikeler genel olarak yapısal hasar, yapısal olmayan hasar, yapısal olmayan tehlikeler, yapısal olmayan riskler ve yapısal riskler olmak üzere çeşitli alt sınıflarda toplanmaktadır [12]. Yapısal olan risklere baktığımız zaman genel olarak kolon, perde ve yahut kiriş gibi taşıyıcı sistem elemanlarından kaynaklanan sorunların ön plana çıktığı görülmektedir [12]. Dünya genelinde doğal afetler büyük önem taşımaktadır ve bunlar yapısal olmayan hasar kısmında yer almaktadır [13]. Özellikle deprem zemine zarar veren ve büyük sonuçları doğurabilecek bir etkidir. Depremlerin sonucunda zeminin güç kaybetmesi ve sıvılaşma problemi gün yüzüne çıkmaktadır [11].

Yapılan araştırmaların ve istatiksel verilerin sonuçlarına bakıldığı zaman artan dünya nüfusu ile barınma ihtiyacı ve sosyal alan ihtiyacının artmakta olduğu bulgusuna erişilmiştir [10]. Dolayısıyla dünya üzerinde zeminin izin vermediği birçok boş arsanın topluma kazandırılması ve değerlendirilebilmesi için zemin güçlendirme çalışmaları yapılmalıdır [10; 11].

Bütün bu etkenlerden dolayı şu anda bulunduğumuz çağda zeminin dayanıklılık konusu hem akademik olarak hem de ticari olarak büyük önem kazanmıştır [10]. Bu

doğrultuda çeşitli yöntemlerin geliştirilmeye devam ettirildiği literatürde ve uygulamalarda görülmektedir. Geliştirilen yöntemler aracılığıyla hem önceden yapılan zeminlerin güçlendirilmesi sağlanmaktadır hem de hayata geçirilecek projelerin verimi arttırılmaktadır. Bu duruma ek olarak deprem ve sel gibi büyük tehlikelere karşı zeminler güçlendirilmiş olacaktır [10; 11].

Zeminin olumsuz etkilerini girerek kaplamada oluşabilecek yıpranmaları önleyerek zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirip, kaplama kalınlığını azaltarak zemine çimento, kireç, uçucu kül, tabii puzolan vb. maddeler katılır buna kimyasal stabilizasyon denir. Amaç zeminde güçlendirmeyi sağlayarak zemindeki deformasyonu önlemektir [14].

1.5 Zeminlerin İyileştirilmesi

Zemin iyileştirilmesi stabil olmayan ürünlerin herhangi bir güvenlik riski ile karşılaşılması için seçilen protokollerden biridir. Sektörde yer alan proje çeşitliliği ile orantılı olarak zeminlerinde farklılaştığı sonucuna yapılan araştırmalar doğrultusunda ulaşılmaktadır. Dolayısıyla üzerinde işlem yapılacak olan zeminin uygulanacak olan projeye uygun hale getirilebilmesi gerekmektedir. Yapılan birçok literatür çalışmalarının sonuçlarına bakıldığında zaman zaman zemin iyileştirilmesinin belirli etkenlerden dolayı tüm zeminin değiştirilmesinden daha çok tercih edildiği bulgusuna varılmıştır. Bu duruma neden olan faktörlerin en başında ekonomik ve teknolojik alt yapıların bulunduğu görülmektedir [11].

Zemin iyileştirilmesinin tarihçesine bakıldığında zaman başlangıcının 1970'li senelerine denk geldiği sonucuna erişilmiştir. Dolayısıyla uzun yıllar boyunca gerçekleştirilen bu protokolün gelişen teknoloji ile daha ileri seviyeye taşındığı sonucuna varılmıştır [11].

Zemin iyileştirilmesinin uygulanabilmesi için çalışılacak olan zeminin ihtiyaçlarını incelemek gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu doğrultuda uygulanacak olan proje ile zeminin yapısını tasarlarken geoteknik faktörler göz önüne alınmaktadır. Proje ve zeminin uyumluluğu yüksek oranda ise daha yüzeysel alt yapılar dizayn edilir [11]. Yapılan literatür taramasından elde edilen bulgulara göre yüzeysel şekilde tasarlanan yapılarının sonucunda bazı olumsuzluklarla karşılaşıldığı bulgusuna erişilmiştir.

Bu duruma zemindeki sıvılaşma ihtimalinin artması, taşıma kapasitesinin istenileni karşılamaması, oluşturulacak yapıda eğilmelerin meydana gelmesi ve şev duyarsızlığı örnek olarak verilebilmektedir. Ayrıca zeminlerde çökme sorunu ve kabartılarda yüzeysel şekilde tasarlanan yapıların neden olabileceği olumsuzluklar arasında yer almaktadır [11].

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığı zaman çok çeşitli zeminlerin olduğu ve bu zeminlerin özelliklerinin de farklılaştığı görülmektedir. Bu doğrultuda zemin iyileştirilme çalışmalarında kullanılacak olan yöntemin ilgili zemine uygun bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla zeminin özelliklerinin belirlenebilmesi için çeşitli miktarda deneysel yöntemler ve farklı araziler incelenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Genel olarak koni penetrasyon deneyinin bu tür çalışmalarda muhakkak yapılması gerektiği bulgusuna erişilmiştir [11].

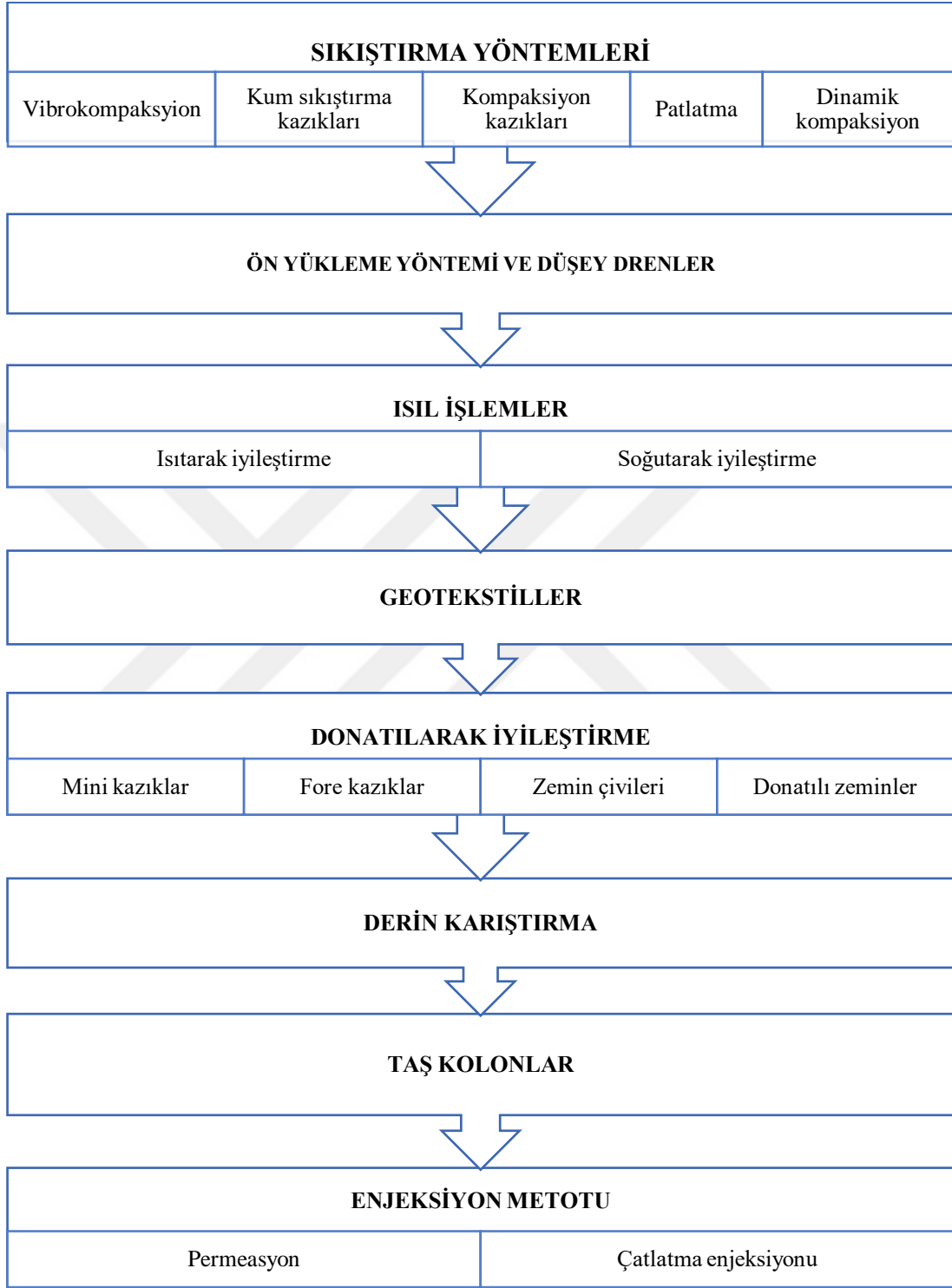
Zemin iyileştirme metotları arasında uygun olanı tercih edebilmek için bazı etkenlerin göz önünde bulundurulması gerektiği bilinmektedir. Bu etkenler aşağıda maddeler halinde bulunmaktadır [11].

- Zeminin yapısal durumu
- YASS düzeyi
- Çevreye bağlı faktörler
- Ekonomik durum
- Beklenen yüzeyin artması
- Çalışma planı, şantiye alanına erişebilirlik, makine ve çalışanın gücü
- Yaşam alanlarının çalışılacak araziye olan mesafesi
- Var olan yapının yapılacak işleme olan uyumu
- Sıvılaşma sorunu

Zemin iyileştirme yöntemlerinin çeşitliliğinden dolayı işlem yapılacak zeminin özelliklerine bağlı olarak kullanılacak olan metodun ona göre seçilmesi gerekmektedir. İşleme başlamadan önce zeminin özellikleri ve maliyet kıyaslamasıyla birlikte seçilecek olan yöntemle karar verilmesi gerekmektedir [11].

Zemin iyileştirmesi için uygulanan yöntemlere bakıldığı zaman vibro kompaksiyon, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon kazıkları, patlatma, ısıtma, soğutma, geosentetik yöntemler, ön yükleme, zemin çivileri, donatılı zemin, taş kolonlar,

çatlatma, derin karıştırma, mini ve fore kazıkların ön plana çıktığı görülmektedir. Fakat tercih edilen yöntemde zemin çeşidi büyük önem taşımaktadır.



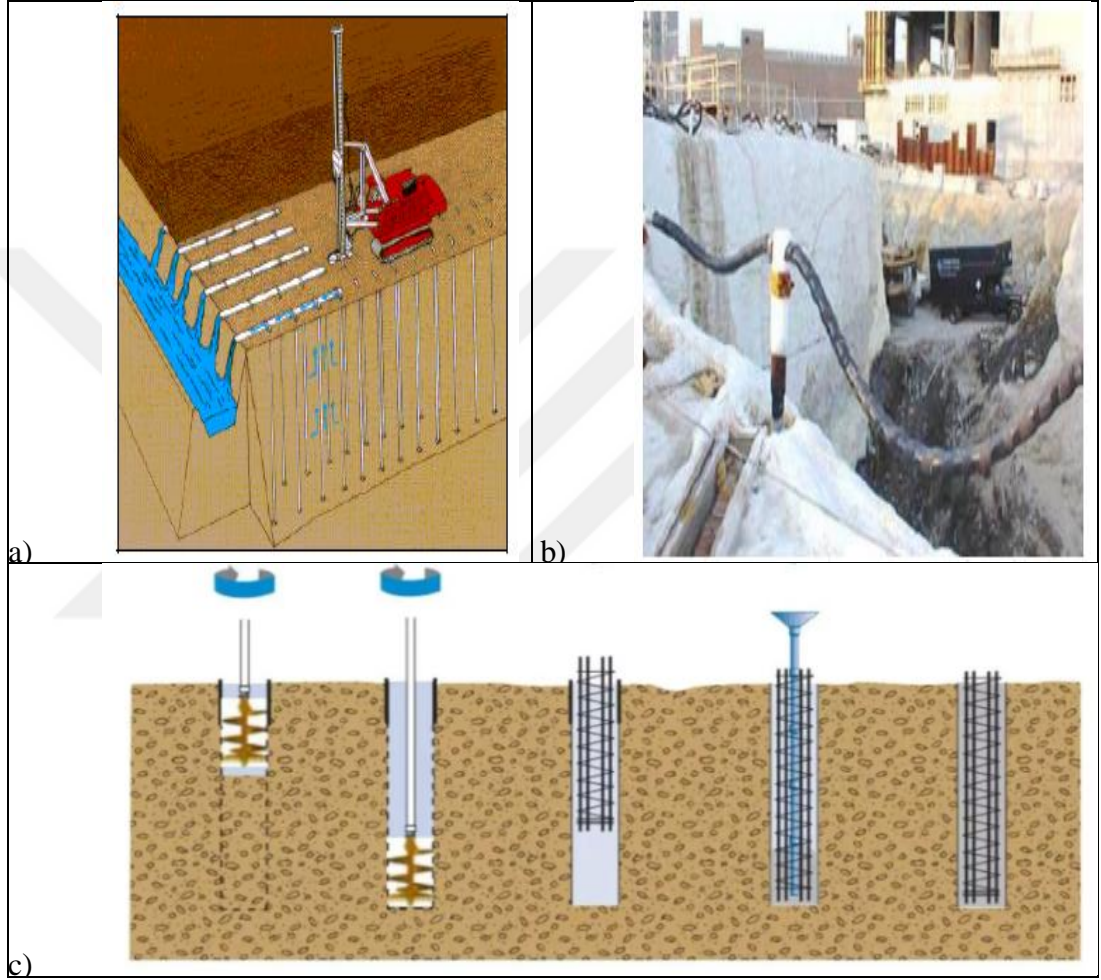
Şekil 1.1: Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Alt Sınıfları

Kaynak: (Öztürk, 2006)

Örneğin daneli zeminlerde tercih edilen vibro kompaksiyon ve dinamik kompaksiyon çeşitleri kohezyonlu zeminlerde tercih edilmemektedir. Ayrıca ön yükleme, düşey

drenler ve ısıtma gibi yöntemler kohezyonlu zeminlerde kullanılmasına rağmen daneli zeminlerde tercih edilmemektedir [11]. Aşağıda yer alan Şekil 1.2’de zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan ana yöntemler ve bunların alt başlıkları bulunmaktadır.

Yapılan literatür taraması sonucunda farklı zemin iyileştirme yöntemlerine yönelik birkaç görsel aşağıda yer almaktadır.



Şekil 1.2: a) Düşey Dren Yöntemi, b) Zemin Dondurma c) Fore Kazık

Kaynak: (Selçukhan ve Ekinci, 2021)

Bu duruma ek olarak zeminlerin iyileştirilmesindeki hedefler incelendiği zaman farklı alt sınıfların olduğu görülmektedir. Bunlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir [11].

- Taşıma kapasitesi
- Oturma kontrolü
- Stabilite
- Çevresel nedenler

- Sıvılaştırma

Zemin iyileştirilmesinde uygulanan metotların zemin türü ve zeminin iyileştirme hedefine bağlı olarak değiştiğine dair çeşitli örnekler verilebilmektedir. Örneğin vibrokompaksiyon daneli zeminler için tercih edilirken taşıma kapasitesi, oturma kontrolü ve sıvılaştırma sorunlarında uygulanmaktadır. Bu duruma ek olarak ön yükleme yöntemi kohezyonlu zeminler açısından tercih edilirken taşıma kapasitesi ve oturma kontrolü gibi faktörleri hedeflemektedir. Mini ve fore kazıklar daneli ve kohezyonlu zemin türleri açısından tercih edilmektedir. Bu duruma ek olarak fore kazıklar taşıma kapasitesi ve stabiliteye yönelik hedeflenen çalışmalarda kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra mini kazıklar taşıma kapasitesi ve oturma kontrolüne yönelik yapılan çalışmalarda tercih edilmektedir [11].

Taşıma gücü zayıf zeminlerde; kireç, çimento veya asfalt gibi katkı maddeleri eklenerek elde edilen karışımlarla zayıf zeminin fiziksel özelliklerini değiştirmek suretiyle zemin iyileştirme mümkün görülmektedir. Atıksu çamuru külü atık malzeme olduğundan diğer katkı maddelerine (asfalt, çimento v.b.) oranla maliyet açısından daha düşüktür. Atık malzemelerin geri dönüşüm malzemesi olarak kullanılması hem maliyeti düşürecek hem de ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır. Bu bağlamda atık malzeme olan atıksu çamuru külünün zayıf zeminlerde etkili bir biçimde geri dönüşüm malzemesi olarak çözüm üretebileceği düşünülmektedir.

1.5.1 Kireç ile zemin iyileştirme

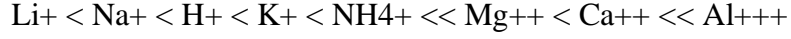
Kireç geçmişten bugüne zemin iyileştirme süreçlerinde kullanılan bir hammaddedir. Bu durumun nedenleri arasında kolaylıkla ve sıklıkla bulunabilir olması ön plana çıkmaktadır. Bu duruma ek olarak çevreye herhangi bir zararının olmaması da büyük önem taşımaktadır [15]. Kirecin zemin iyileştirmede kullanılabilir olma nedenleri arasında taşıma gücünü artırıyor olması, yüzeysel suların akışını ve yer değiştirmeyi azaltıcı özelliklerinin bulunmasıdır. Bu duruma ek olarak kireç killi zeminlerin plastik limitini artırmaktadır. Dolayısıyla da stabilizasyon özelliği yüksek miktardadır [16].

Zemin iyileştirilmesinde genel olarak kullanılan 3 farklı kireç sınıfı bulunmaktadır. Bunlar aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir [15-16].

- Sönmüş yüksek kalsiyum kireci
- Monohidratlı dolomitik kireç

- Sönmemiş kalstik veya sönmemiş dolomitik kireç

Kirecin killi zeminler üzerindeki etkisine bakıldığı zaman farklı yönlerden etkilediği sonucuna varılmıştır [17]. Bu etkiler katyon değişimi, flokülasyon, pozolanik reaksiyon ve karbonatlaşma olarak özetlenebilmektedir. Katyon değişimi ve flokülasyonda aşağıda Lyotropic serileri ile gösterilmekte olan durumda katyonlar sırayla soldakinin yerini almaktadır.



Pozolanik reaksiyonda ise çeşitli çimentolaşmaların olduğu görülmektedir. Bu tür reaksiyonlardaki en önemli faktörün pH değeri olduğu ve yüksek pH değerinin kireç ile reaksiyona girilebilmesi için önem taşıdığı bulgusuna erişilmiştir [15]. Karbonatlaşmada ise kirecin hava ile etkileşimde olması gerekmektedir [15-18].

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda kireç içeriğinin etkisine bakıldığı görülmektedir. Bu durumu özetlemek adına Şekil 1.3 oluşturulmuştur [17].



Şekil 1.3: Zemin Farklılığına Göre Kireç İçeriğinin Etkisi

Kaynak: (Tunç, 2001)

Bu çalışmadan da elde edilen sonuçlara göre killi çakıl kullanılarak kireç ile zemin iyileştirilmesi yapılabilmektedir. Bu duruma ek olarak killere zemin sınıflaması yapıldığı zaman TS 1500 zemin sınıflaması orta plastisiteli (CI), yüksek plastisiteli (CH) ve düşük plastisiteli (CL) belirtmektedir [17].

Sahada kireç ile yapılan zemin iyileştirmenin aşamaları aşağıda yer alan Şekil 1.4’de gösterilmiştir [20].



Şekil 1.4: Kireç ile Zemin İyileştirme Aşamaları

Kaynak: (Akyarlı ve diğ, 2009)

Şekilde de görüldüğü üzere öncelikle killi zeminin gevşetildiği sonrasında kirecin serildiği görülmektedir. Daha sonra karıştırma işlemi yapılmaktadır ve son olarak sıkıştırma işlemi yapıp sağlam zemin elde edilmektedir [20].

Bu duruma ek olarak aşağıda yer alan şekilde karayolunda kireç ile zemin iyileştirmenin aşamaları gösterilmektedir. Bu doğrultuda öncelikle zemin pulluk ile gevşetilmektedir ve gevşeyen zemin üzerine kireç serimi yapılmaktadır. Daha sonrasında karıştırma sürecinde greyder kullanılmaktadır ve sulama yapılmaktadır. Sıkıştırma işlemi sonrasında zeminin dayanıklılığını ölçebilmek için plaka yükleme deneyi uygulanmaktadır [20].



Şekil 1.5: Karayolunda Kireç ile Zemin İyileştirme

Kaynak: (Akyarlı ve diğ, 2009)

1.6 Literatür Araştırması

Dünya üzerinde her geçen gün artan nüfus miktarının getirdiği olumsuzlukların yüzdelik oranı gittikçe artmaktadır. Bu doğrultuda dünya genelinde atık su arıtma tesisinden dolayı arıtma çamuru üretiminin fazlaştığı sonucuna erişilmiştir [23].

Arıtma çamurları, atık suların arıtımında yan ürün olarak meydana çıkan atık maddeler olduğu bulgusuna erişilmektedir. Arıtma çamurunun hacimsel oranı zaman içinde hızlıca artmaktadır. Bu duruma ek olarak metropolleşme ve nüfus artışına

bağlı olarak yüzdelik olarak daha fazla bir artışın meydana geleceği beklenmektedir. Literatürde yapılan araştırmalara göre arıtma çamurunun uzaklaştırılması, kullanımı, depolanması ve tarımsal kullanımı tercih edilen çözümler arasında yer almaktadır. Yapılan son araştırmalara göre hali hazırda uygulanan temizleme tekniklerinin su, toprak ve hava kirliliği gibi ekolojik problemlere neden olduğu bulgusuna erişilmiştir [23].

Aritma çamurunun uzaklaştırılması için kullanılan yöntemler arasında düzenli depolamanın daha ucuz olduğu bulgusuna erişilmiş olup; bu durumun temel nedeni olarak fakir arazilerde mahsulün yetiştirilmesine olanak sağlamasıdır. [23]. Çamur, atık su işlemi sırasında üretilen diğer yan ürünlerle karşılaştırıldığında yüksek miktarda ağır metaller ve mineralleri kapsadığı bulgusuna erişilmiştir. Kimyasal oluşumlarına bakıldığı zaman ağır metallere sahip olduğu bulgusuna ulaşılmıştır [23-24]. Bu duruma ek olarak arıtma çamuru ayrıca organik kimyasallar, mineraller ve tuzlar gibi çözülebilir kimyasalları da içermektedir [25].

Literatürde atıksu arıtmasına yönelik birçok çalışma yapıldığı gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda yapılan bazı çalışmalara yönelik kısa özetler oluşturulmuştur.

Atık su arıtma çamur külü katkısının kompozit malzeme mekanik özelliğine etkisi üzerine yapılan araştırmada karışımın çekme, üç noktadan basma, darbe testleri aracılığıyla hazırlandığı ve atık su arıtma çamur külü oranı ağırlıkça tüm karışımın % 0 ile % 45'i arasında olduğu görülmektedir [26]. Deneyler süresince çekme testi ve üç noktadan basma testi için test makinesinin hızı 1 mm/dak. ve 2 mm/dak. olarak ayarlanmıştır. Üç noktadan eğme testi yapıldıktan sonra elde edilen verilere göre, kompozitte eklenen atık su arıtma çamur miktarı fazlaştıkça maksimum stres azalmaya doğru ilerler. Yapılan çekme testinin sonuçlarına göre, maksimum gerilme, atık su arıtma çamur külü partikülleri tüm karışıma oranla % 20 artış olduğu görülmektedir.

Bu oran arttıkça azalma eğiliminin ortaya çıktığı da yapılan araştırmanın sonuçları arasında yer almaktadır. Bu duruma ek olarak yapılan darbe testinin sonuçlarına göre kül oranı % 10 ile % 25 aralığında olduğu zaman darbe direncinin düştüğü görülmektedir.

Bu duruma ek olarak kül oranı % 40'a ulaşana kadar değer stabil kalmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre % 10 oranının ideal bir oran olduğuna varılmıştır [26].

Literatürde yapılan araştırmalar incelendiği zaman doktora çalışmalarında da bu tür konuların işlendiği görülmektedir. Akbulut tarafından 2020 senesinde yapılmış olan 'Arıtma çamuru külünün zemin iyileştirmede kullanımı' konulu tez çalışmasında yakma işleminden geçmiş olan artıma çamur külünün zeminlerde stabilizötör olarak kullanılması araştırılmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan küllerin Gaziantep'te bulunan atıksu arıtma tesisinden elde edildiği görülmektedir. Çalışmanın detaylı olabilmesi için %0, %5, %10, %15, %20 ve %30 oranında kille karışım hazırlanmıştır [27].

Yapılan bu çalışmanın detaylandırılabilmesi için çeşitli deneyler tercih edilmiştir. Bu deneyler arasında Atterberg kıvam, standart Proktor, tek eksenli basınç dayanımı (UCS), Kaliforniya taşıma oranı (CBR), laboratuvar tipi kanatlı kesici (vane deneyi), konsolidasyon, düşen koni, düşen seviyeli permeabilite, ve plaka yükleme deneyleri bulunmaktadır. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre yüzde de artış meydana geldikçe kilin likit limit ve plastisite indeksindeki oranın %30'a yükseldiği sonucuna varılmıştır. Bu duruma ek olarak arıtma çamuru kül miktarının %5'ten %30'a yükseltilmesi durumunda birim hacim ağırlığının yaklaşık olarak %2 oranında azaldığı bulgusuna erişilmiştir [27].

Kül oranı %30'a yaklaştıkça kil-kül karışımları için optimum su muhtevasının yaklaşık %40 fazlaştığı elde edilen sonuçlar arasındadır. Suda inkübe edilmiş CBR numunelerinin performansı katkısız kil numunelerine oranla 6 kat daha fazla arttığı, suda bekletilmiş numunelerin ise katkısız kile göre 4 kata kadar fazlaştığı sonucuna erişilmiştir. Kür zamanlarının UCS ve CBR deneylerine göre farklılaşan bir etkiye sahip olduğu bulgusuna erişilmiştir [27].

UCS miktarlarına bakıldığı zaman herhangi bir eklemesi olmayan kil örneklerine oranla 3 kat yüksek olduğu bulgusuna erişilmiştir. Yapılan plaka deneylerinin sonuçlarına göre eklenen AÇK oranı ile killerin taşıma gücünün %75 oranında arttığı sonucuna erişilmiştir. Plaka yükleme deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için 2.0 m çapında, 1.5 m derinliğinde ve 40 ton yükleme kapasitesine sahip çelik çerçeveli betonarme bir dairesel model kutunun oluşturulduğu bilgisine erişilmiştir. Plaka

yükleme deneylerinin sonuçları, AÇK ilavesinin taşıma kapasitesini artırdığını ve AÇK katkılı numunelerin, katkısız kil numunelerine göre daha az oturma özelliği olduğu bulgusuna erişilmiştir.

Literatürde incelenen bu doktora araştırmasının sonucunda deneylerden elde edilen bulgulara göre AÇK'nın alternatif bir zemin stabilize edici katkı maddesi olarak kullanılabilceğini bilgisine ulaşılmıştır [26].



2. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Bu çalışmadaki temel amaç, katkılı zemin stabilizasyonda atıksu çamuru külü (AÇK)'nün tek başına ve kireçle beraber kullanımının zeminlerin mukavemet ve rijitlik özelliklerine olan etkisinin araştırılmasıdır. Bu bölümde çalışma kapsamında hazırlanan karışımların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalar, deneylerde uygulanan standartlar ve numunelerinin notasyonları anlatılmıştır.

2.1 Materyal

Bu çalışma kapsamında kullanılan doğal malzeme Tokat ilinin Erbaa ilçesinden 320 rakımlı bir bölgeden ve yüzeyden yaklaşık 3.0 m derinlikten alınmıştır. Alınan malzeme Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'na getirilmiştir. Deneylerden önce doğal malzeme 24 saat etüvde kurutulmuş ve sonrasında deneysel çalışmalara başlanılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında, hazırlanan numunelere verilen notasyonlar Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1: Deney Numuneleri Notasyonları

Numunelerin katkı oranı	Notasyon
Saf Zemin	Z
Saf zemin+%10AÇK	ZK0A10
Saf zemin+%10Kireç	ZK10A0
Saf zemin+%2.5Kireç+%7.5AÇK	ZK25A75
Saf zemin+%5Kireç+%5AÇK	ZK5A5
Saf zemin+%7.5Kireç+%2.5AÇK	ZK75A25

2.1.1 Saf zemin

Deneyleerde kullanılan zemin Tokat ilinin Erbaa ilçesindeki $40^{\circ} 40' 21''$ kuzey enlemi ve $36^{\circ} 34' 20''$ doğu boylamında bulunan 320 m rakımlı bölgede bulunan bir araştırma çukurundan, yüzeyden yaklaşık 3.0 metre derinlikten temin edilerek Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'na getirilmiştir. Burada 0.425 mm elek açıklığı bulunan 40 No'lu elekten geçirilerek, deneyleerde kullanılacak bir malzeme haline getirilmiştir. Doğal malzemenin alındığı yerin konumu Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1: Doğal Malzemenin Alındığı Yerin Konumu

Yapılan elek analizi sonucunda zemin sınıfı, ASTM D 2487 (2011) standardına göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan saf zemine ait temel fiziksel özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2: Saf Zemine Ait Temel Fiziksel Özellikler

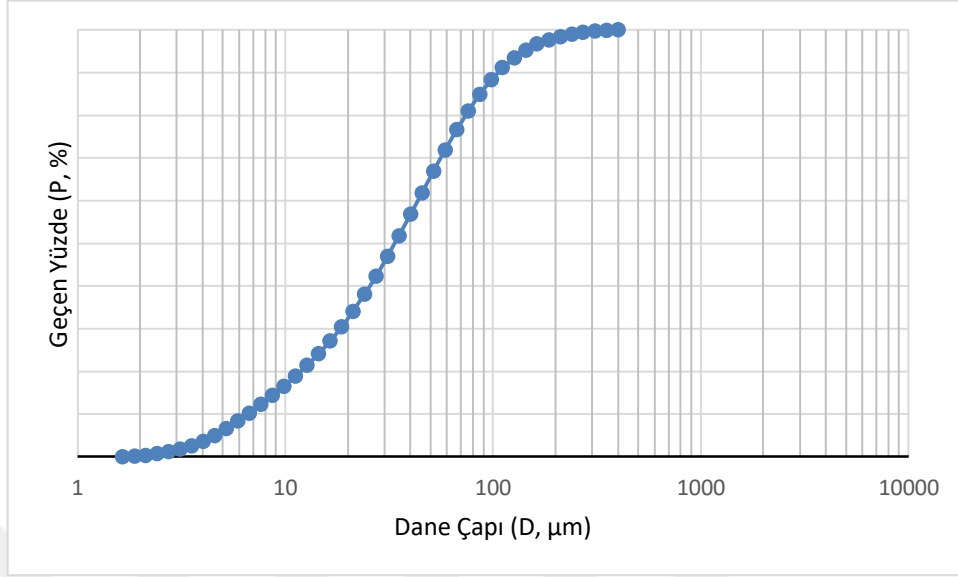
USCS'ye zemin sınıfı	CH
Özgül ağırlık	2.64
Maksimum kuru yoğunluk, Mg/m ³	1.75
Optimum su içeriği (%)	21
Likit limit, LL (%)	40.53
Plastik limit, LL (%)	15.80
Plastisite indisi, PI (%)	24.73
Renk	Kahverengi

Saf zemine elek analizi ve lazer kırınım yöntemi uygulanmıştır. 200 No'lu elek altı dane büyüklüğü dağılımının belirlenmesinde lazer kırınım yönteminde belirlenen kil yüzdesi hidrometre ve pipet yöntemiyle belirlenenden daha güvenilir olduğu literatürde ifade edilmiş olup; bunun en önemli sebebi tane şekli olduğu vergulanmıştır. [28]. Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde saf zemine lazer kırınım testi yapılmıştır. Deneyin yapıldığı cihaz Mastersizer Hydro 3000 olup; cihazın görüntüsü Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2: Mastersizer Hydro 3000 Lazer Kırınım Cihazı

Saf zemin için elek ve lazer kırınım analizleri sonucu belirlenen dane boyutu dağılım eğrisi Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3: Doğal Malzemenin Dane Boyutu Dağılım Eğrisi

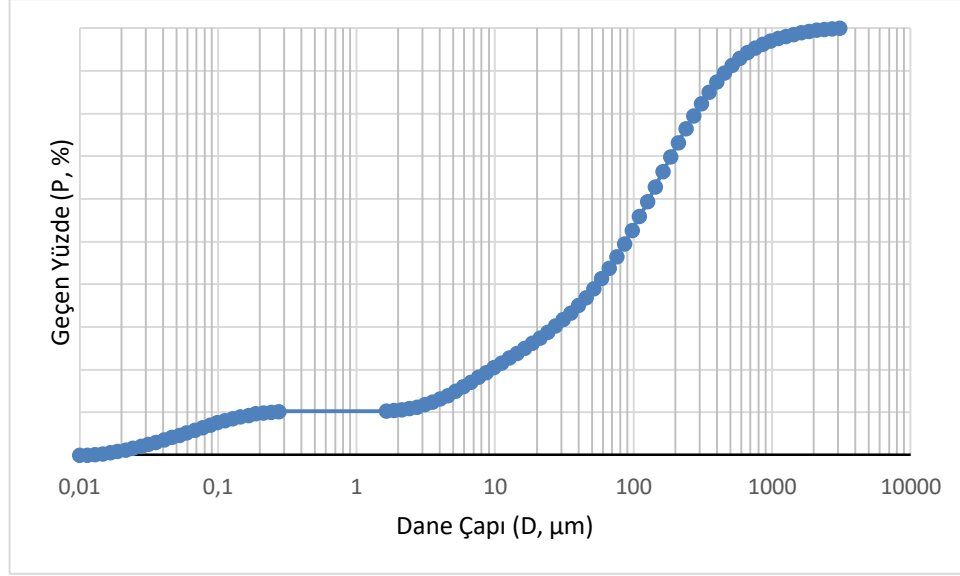
2.1.2 Kireç

Deneyleerde kullanılan kireç Bayraktar Kireç Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından üretilen SKK80-T söndürülmüş toz kalker kirecidir. Kullanılan kireçle ilgili kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3: Söndürülmüş Toz Kirece Ait Fiziksel ve Kimyasal Özellikler

Fiziksel Özellikler	
75 µ elek üzeri (%)	4.4
Özgül Ağırlık	2.32
pH Değeri	12.2
Yoğunluk (Mg/m ³)	0.477
Kimyasal Özellikler	
SiO ₂ (%)	5.148
Al ₂ O ₃ (%)	1.043
Fe ₂ O ₃ (%)	0.658
Aktif CaO (%)	61.189
MgO (%)	0.58
Na ₂ O (%)	0.322

Kireç için elek ve lazer kırınım analizleri sonucu belirlenen dane boyutu dağılım eğrisi Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4: Söndürülmüş Toz Kirece Ait Dane Boyutu Dağılım Eğrisi

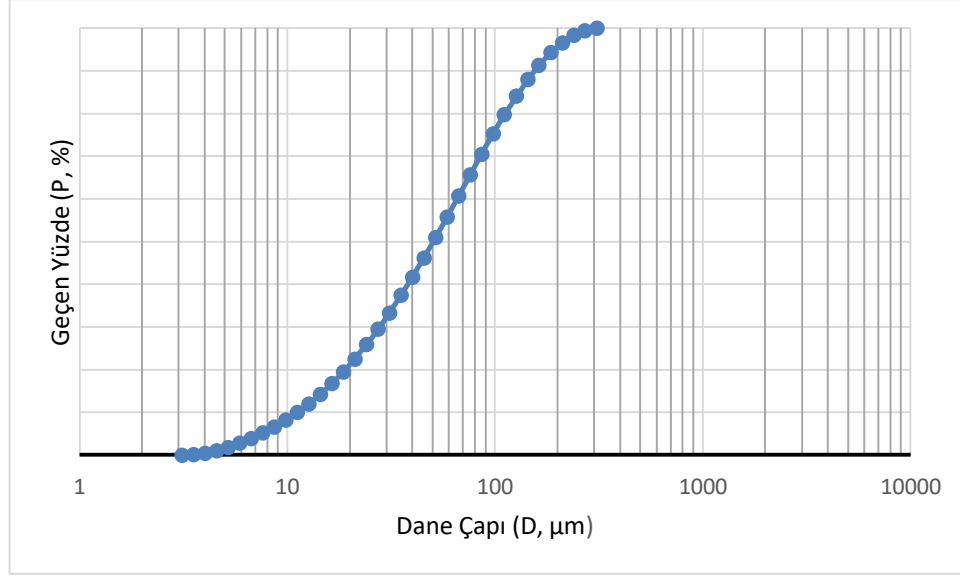
2.1.3 Atıksu çamuru külü (AÇK)

Deneylerde kullanılan atıksu çamuru külü (AÇK) Bursa Batı Atıksu Arıtma Tesisi'nden elde edilmiştir. Kullanılan AÇK ile ilgili kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 2.4'te, verilmiştir.

Çizelge 2.4: Atıksu Çamuru Külüne Ait Fiziksel ve Kimyasal Özellikler

Fiziksel Özellikler	
75µm elek üzeri (%)	4.4
Özgül ağırlık	2.32
pH Değeri	12.2
Yoğunluk (Mg/m ³)	0.477
Kimyasal Özellikler	
SiO ₂ (%)	31.651
Al ₂ O ₃ (%)	6.965
Fe ₂ O ₃ (%)	5.718
Aktif CaO (%)	21.973
MgO (%)	3.497
Na ₂ O (%)	1.213

Atıksu çamuru külü için elek ve lazer kırınım analizleri sonucu belirlenen dane boyutu dağılım eğrisi Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5: Atıksu Çamuru Külüne Ait Dane Boyutu Dağılım Eğrisi

2.2 Yöntemler

Tezin bu bölümünde uygulanan deney yöntemleri ve deneylerde dikkate alınan standartlar verilmiştir.

2.2.1 Deneylerde dikkate alınan standartlar

DeneySEL çalışmalar kapsamında dikkate alınan ASTM standartları Çizelge 2.5'te verilmiştir.

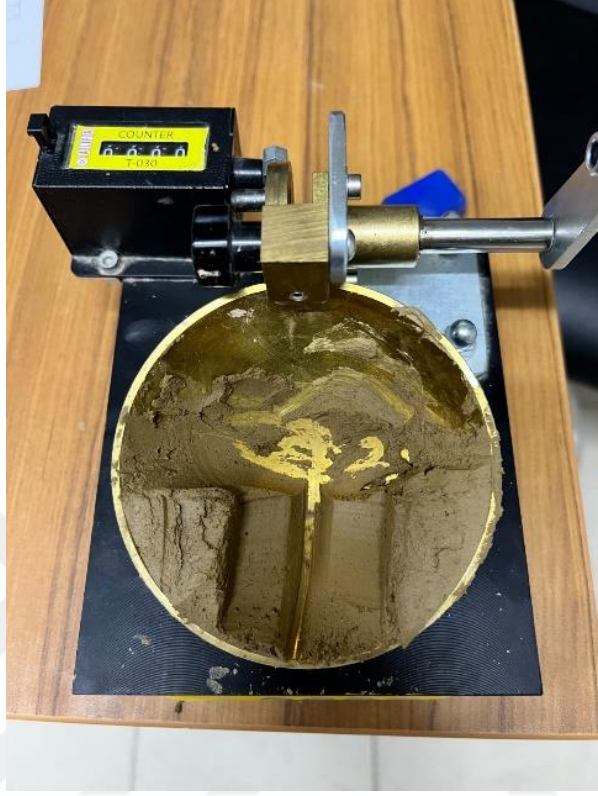
Çizelge 2.5: Deneyler ve İlgili ASTM Standartları

Deney Adı	
Elek analizi	ASTM-D422-63 (2014)
Özgül ağırlık deneyi	ASTM-D854-14 (2014)
Kıvam limitlerinin belirlenmesi	ASTM-D4318-10 (2014)
Standart Proctor deneyi	ASTM-D698-12 (2014)
Serbest basınç deneyi	ASTM-D2166/D2166M-13. (2013)
Ultrasonik hız deneyi	ASTM C597-16 (2016)

2.2.2 Kıvam limitlerinin belirlenmesi

Bu çalışmada likit limitlerin belirlenmesi için kullanılan yöntem Casagrande yöntemidir. Bu yöntemde Şekil 2.6'de görülen Casagrande deney aletine farklı su içeriklerinde zemin numuneleri yerleştirilmiş olup standart çentik açma aparatı ile

açılan çentiğin kapanmasına denk gelen vuruş sayısı kaydedilmiştir. Çentik kapandıktan sonra örneğin su içeriğini belirlemek için bir miktar alındıktan sonra zemin numunesine artan oranlarda su eklenerek bu işlem devam edilmiştir.

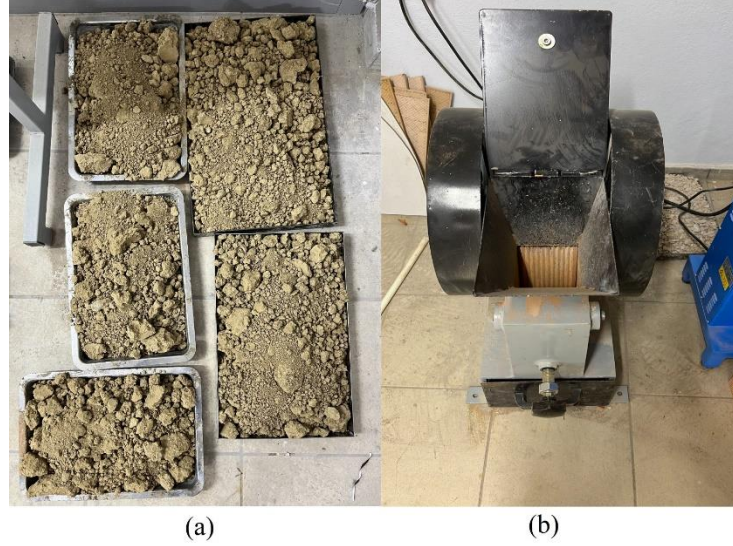


Şekil 2.6: Casagrande Deney Aleti

Plastik limit ise 40 No'lu elekten geçmiş ve içerisine bir miktar su katılarak yoğrulmuş malzemenin avuç içiyle cam plaka üzerinde yuvarlanarak, 3 mm'de oluşan çatlamalara karşılık gelen değerdir.

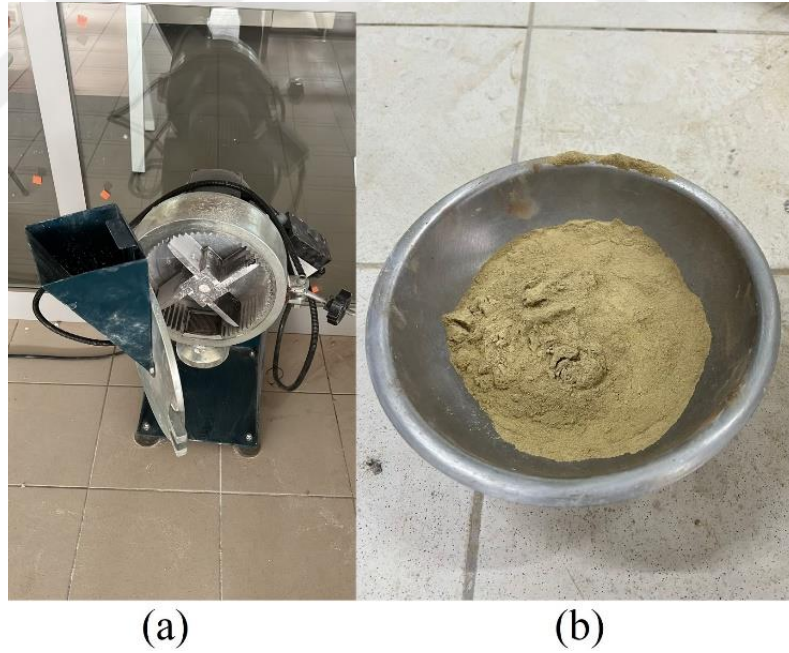
2.2.3 Öğütme işlemi

Saf zemin ile numuneler hazırlanmasına başlanmadan önce iki aşamalı bir öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada Şekil 2.7 (a) da görülen doğal ve kurutulmuş zemin Şekil 2.7 (b)'de görülen iri çeneli kırıcı ile öğütülerek topaklanma ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 2.7: a) Doğal Zemin, b) İri Çeneli Kırıcı

İkinci aşamada ise Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Yapı malzeme laboratuvarında bulunan Şekil 2.8 (a)'da görülen ince malzeme değirmeninde öğütülüp Şekil 2.8 (b)'de görüldüğü üzere deneylere hazır hale getirilmiştir.



Şekil 2.8: a) İnce Malzeme Değirmeni, (b) Öğütme İşlemi Tamamlanmış Saf Zemin

2.2.4 Kompaksiyon deneyi

Gevşek halde bulunan zeminin tabakalar halinde serilerek farklı yöntemlerle sıkıştırılmasına kompaksiyon işlemi denilmektedir. Kompaksiyon işlemi ile zemin taneleri birbirine yaklaşması sonucu boşluk oranı azalmaktadır. Böylece gevşek halde bulunan zemine göre taşıma gücü artmakta, oturma miktarı ve geçirimsizlik

özellikleri azalmaktadır. Laboratuvar ortamında kompaksiyon için genel olarak standart ve modifiye Proctor deneyleri kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında Standart Proctor deneyleri yapılmış olup maksimum kuru yoğunluk ve bu yoğunluğun elde edildiği optimum su içerikleri belirlenmiştir.

Standart Proctor deneylerinde önceden 105°C’de 24 saat süreyle kurutulmuş zemine farklı oranlarda su ilave edilerek Şekil 2.9’da görülen karışım mikseri ile 15 dk süreyle karıştırılmıştır. Böylece karışımın üniform bir şekilde oluşması amaçlanmıştır. Sonrasında hazırlanan karışım standart Proctor kalıplarına 3 tabaka halinde yerleştirilmiş ve her bir tabakaya standart Proctor tokmağı ile 25 vuruş uygulanarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan zemin+kalıp ağırlığı belirlendikten sonra zemin kalıptan çıkarılmış ve su içeriğinin belirlenmesi amacıyla bir miktar örnek alınmıştır. Deney sonucu elde edilen kuru yoğunluk (ρ_k) ve su içerikleri (w) grafiğe işlenerek maksimum kuru yoğunluk ($\rho_{k, max}$) ve bu yoğunluğa karşılık gelen optimum su içerikleri (w_{opt}) belirlenmiştir.

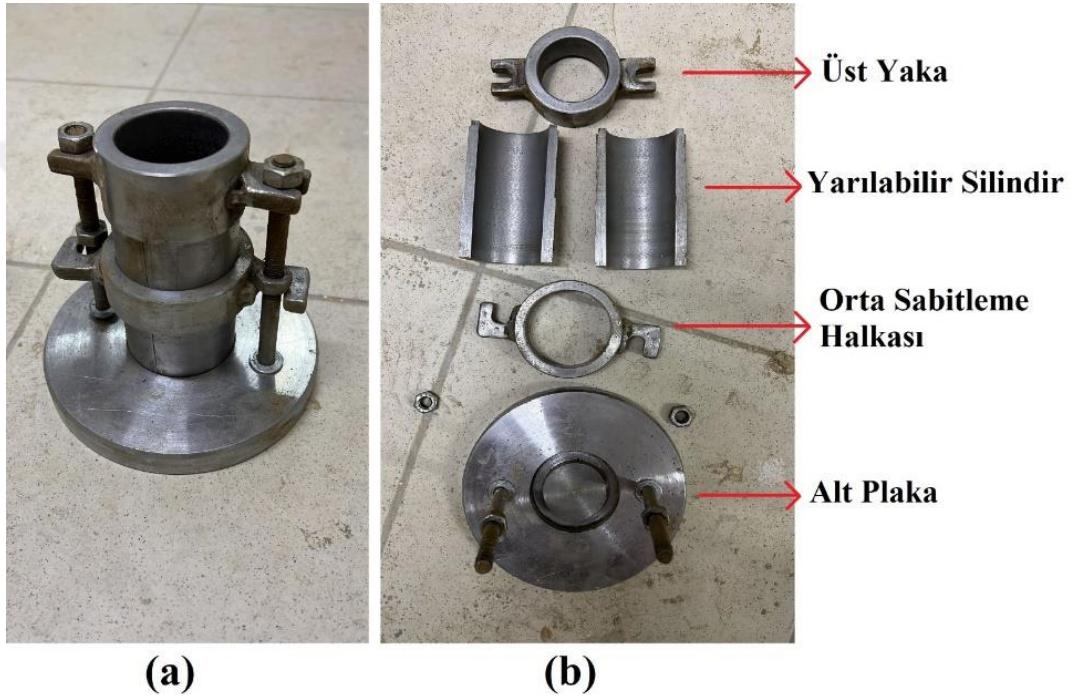


Şekil 2.9: Karışım Hazırlama Mikseri

2.2.5 Numunelerin hazırlanması

Tez çalışması kapsamında AÇK ve kireçle stabilize edilen numunelerin serbest basınç deneyine tabi tutulabilmesi için 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde numuneler oluşturulmuştur. Numunelerin hazırlanmasının ilk aşamasında önceden belirlenen miktarda tartılan kuru malzemeler Şekil 2.9’da görülen mikserde kuru

haldeyken 5 dakika süreyle karıştırılmıştır. Sonrasında Standart Proctor deneylerinden elde edilen optimum su içeriğine denk gelen su miktarı tartılıp kuru karışıma ilave edilerek mikserde 2. karıştırma işlemi 15 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen karışım Şekil 2.10 (a)'da görülen iç yüzeyleri yağlanmış yarılabilir silindirik çelik kalıba 3 eşit tabaka halinde yerleştirilmiştir. Yarılabilir silindir kalıbın iç çapı 50 mm ve yüksekliği 100mm dir. Sıkıştırma işleminin düzgün yapılması için yarılabilir silindir kalıbın üstüne yaka bölümü eklenmiştir (Şekil 2.10 (b)).



Şekil 2.10: a) Numunelerin Hazırlanmasında Kullanılan Kalıp, b) Kalıbın Bileşenleri

Sıkıştırma işlemi Standart Proctor tokmağının ucuna yapılan ve Şekil 2.11'de görülen aparat ile yapılmıştır. Sıkıştırma işleminde Standart Proctor enerjisine denk gelecek şekilde her bir tabakaya 6 vuruş yapılmıştır. Bu vuruş sayısı şu şekilde belirlenmiştir:

$V_{sp} = 904 \text{ cm}^3 \rightarrow$ Standart Proctor kalıbı hacmi

$\Sigma E_{sp} = 75 \times 30.5 \times 2.5 = 5718.75 \text{ kgcm} \rightarrow$ Standart Proctor deneyinde uygulanan toplam enerji

$E_v = \frac{5718.75}{904} = 6.326 \text{ kgcm/cm}^3 \rightarrow$ Standart Proctor deneyinde birim hacime uygulanan enerji

$V_n = 196.35 \text{ cm}^3 \rightarrow$ Numune kalıbı hacmi

$E_n = 6.326 \times 196.35 = 1242.11 \text{ kgcm/cm}^3 \rightarrow$ Numuneleri sıkıştırmak için gereken Standart Proctor enerjisi

$E_1 = 30.5 \times 2.5 = 76.25 \text{ kgcm} \rightarrow$ Standart Proctor tokmağının 1 vuruşundaki uygulanan enerji

$T = \frac{1242.11}{76.25} = 16.3 \rightarrow$ Numuneleri Standart Proctor'a göre sıkıştırmak için gerekli vuruş sayısı

Yukarıda verilen Standart Proctor enerjisi yaklaşımına göre numuneleri sıkıştırmak için gerekli vuruş sayısı 16.3 olarak belirlenmiştir. Ancak kullanılan ara eleman nedeniyle bir miktar enerji kayıplarının olduğu görülmüştür. Yapılan deneme yanılma yöntemine göre 50 mm çapında 100 mm yüksekliğinde numuneleri sıkıştırmak için zemin kalıba 3 tabaka halinde yerleştirildiğinde ve her bir kalıba 6 vuruş yapıldığında (toplamda 18 vuruş) standart Proctor deneyinden elde edilen yoğunluk yaklaşık olarak sağlanacağı görülmüştür. Bu nedenle tüm numuneler toplamda 18 vuruş uygulanarak sıkıştırılmıştır.

Numuneler kalıptan çıkarılmadan önce kalıptaki yaka çıkarılıp numunenin üst yüzeyi dikkatli bir şekilde kesilerek numunelerin boyu 100 mm'ye getirilmiştir. Sonrasında numune kalıptan çıkarılarak alt yüzeyi düzlenmiştir.



Şekil 2.11: Numuneleri Sıkıştırma İşleminde Kullanılan Aparat ve Standart Proctor Tokmağı

Şekil 2.12'de hazırlanmış olan tipik bir 50 mm çaplı, 100 mm yüksekliğinde silindirik numune görülmektedir.



Şekil 2.12: Serbest Basınç Deneyleri İçin Hazırlanan Tipik Numune

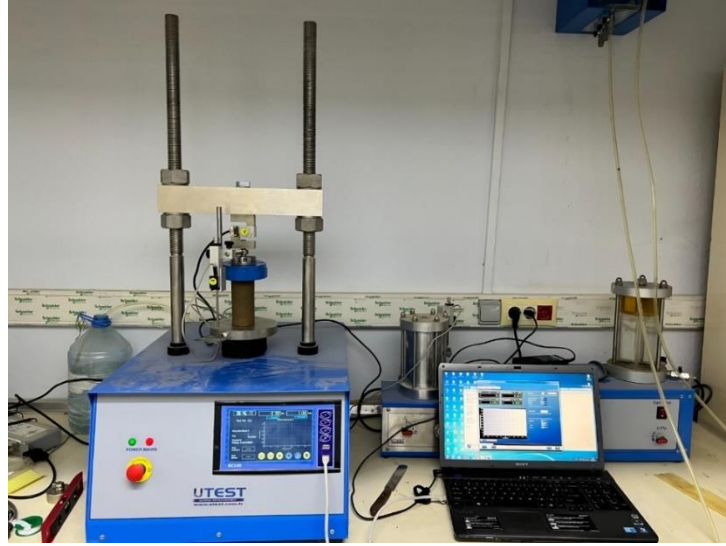
Kalıptan çıkarılan numuneler ince bir plastik filme sarılıp desikatör ortamında Şekil 2.13'de görüldüğü üzere 7, 14 ve 28 gün süreyle küre maruz bırakılmıştır.



Şekil 2.13: Desikatörde Kür'e Maruz Bırakılan Numuneler

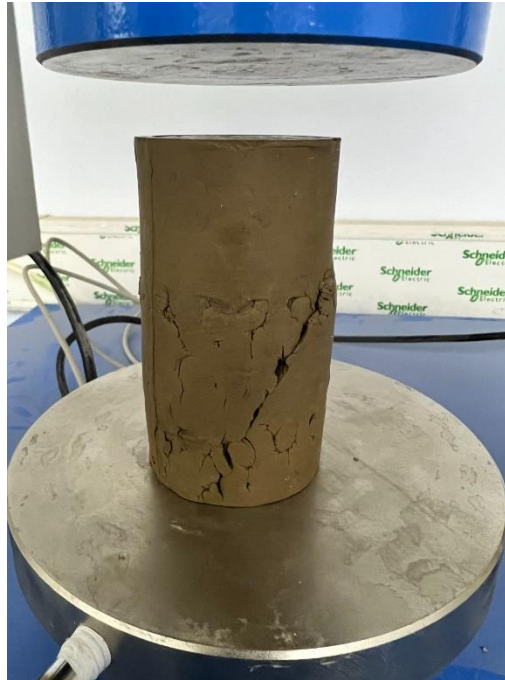
2.2.6 Serbest basınç deneyi (UCS)

Serbest basınç deneyi (UCS) kohezyonlu zeminlerin kayma mukavemetlerinin belirlenmesi için kullanılan deney yöntemlerinden biridir. Bu çalışmada 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde hazırlanmış numuneler ile deneyler yapılmıştır. UCS deneyleri Şekil 2.14'de görülen UTEST firmasına ait üç eksenli, CBR ve serbest basınç deneyleri yapabilen bilgisayar kontrollü deney aleti ile yapılmıştır.



Şekil 2.14: UTEST Marka Bilgisayar Kontrollü Serbest Basınç Deney Aleti

Deneyleerde her bir dakikada 200 adet yük ve deplasman değeri otomatik olarak kaydedilmiştir. UCS deneyleerinde numune yük hücresi altına alt ve üst yüzeyleri düzgün ve pürüzsüz olarak yerleştirilmiştir. Yükleme plakası 1mm/dak hızında gerçekleştirilmiş olup minimum %10 aksnel deformasyon gerçekleşene kadar deneyleer devam ettirilmiştir. Şekil 2.15'te kırılmış bir zemin numunesine ait görsel verilmiştir.



Şekil 2.15: Serbest Basınç Deneyi Sonrası Kırılmış Zemin Numunesi

2.2.7 Ultrasonik titreşim hızı deneyi (UPV)

UPV testi katı durumdaki numunelere frekansı 20 kHz ile 1GHz arasında değişen ses dalgalarının gönderilmesinden oluşan tahribatsız bir deney yöntemidir. Numunelerin mukavemet özelliklerinin doğrudan ölçümlerle belirlenmesinin bazı zorlukları vardır (örneğin, test numunelerinin toplanması, zaman alıcı olması gibi). Bu zorlukların üstesinden gelmek için çeşitli tahribatsız yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler sertlik, darbe penetrasyonuna karşı direnç, geri tepme kapasitesi, ultrasonik titreşim hızı, vb. [29]. Bu yöntemler arasında UPV deneyi pratik, taşınabilir ve ekonomik olması açısından ön plana çıkmaktadır. Sertleşmiş betonun mukavemet özellikleri ve yoğunluğunun UPV deneyi ile tahmini ve kalite kontrolü için çok sayıda çalışma yapılmış ve modeller geliştirilmiştir [30-31]. Ultrasonik titreşim hızı (UPV), test edilen numunelerin uzunluğunun ultrasonik darbenin numunelerden geçiş süresine oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, kür süresine bağlı olarak numunelerin mukavemet özelliklerini tahribatsız bir şekilde belirleyebilmek için numuneler önce kürden çıkarılıp ultrasonik titreşim hızları (UPV) ölçülmüştür. UPV ölçümleri alınmadan önce numunelerin alt ve üst yüzeylerine ultrasonik jel uygulanmıştır. Deneyler üç defa tekrar edilmiştir. Deneylerde Şekil 2.16'da verilen Proseq marka cihaz kullanılmıştır.



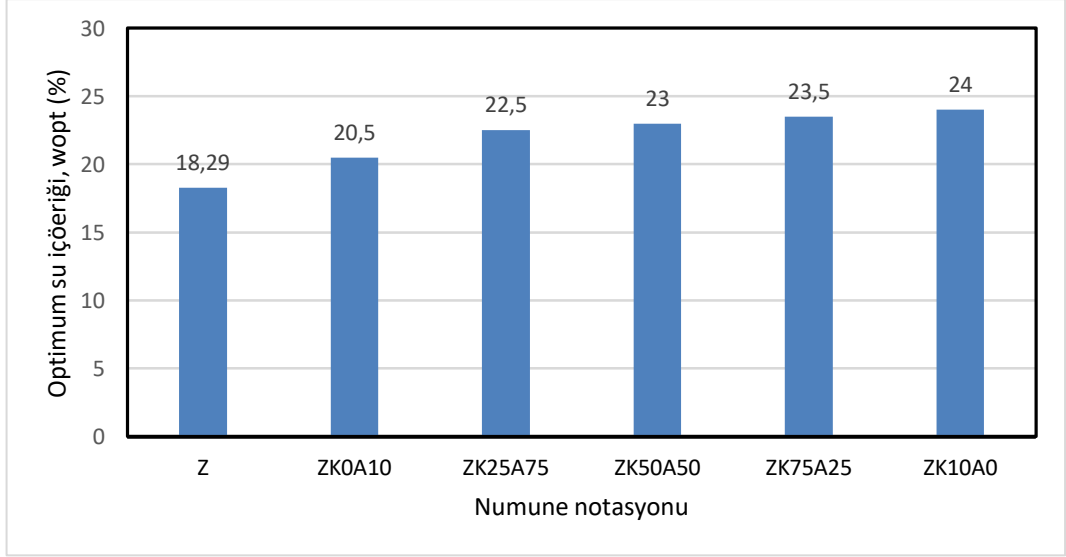
Şekil 2.16: Proseq Marka Ultrasonik Titreşim Deney Aleti

3. BULGULAR VE İRDELEME

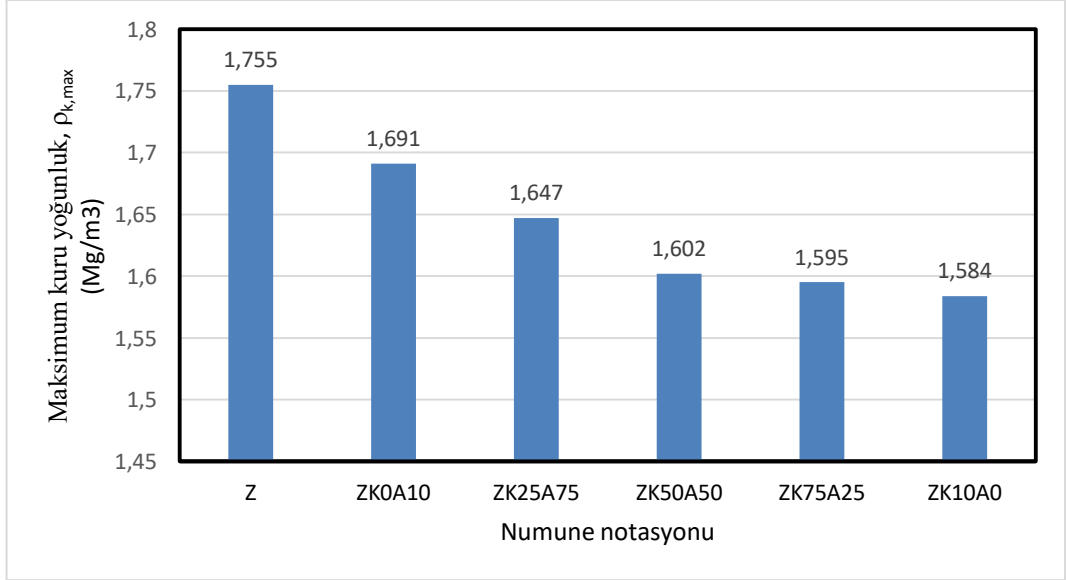
Tez çalışması kapsamında Tokat ili Erbaa ilçesinden alınan killi zemin numunesinin atıksu çamuru külü (AÇK) ve kireçle stabilizasyonu incelenmiştir. Çalışma kapsamında zemine ilave edilecek katkı oranı %10 olarak sabit tutulmuştur. Çalışmanın ilk aşamasında katkı oranlarına bağlı olarak maksimum kuru yoğunluk ($\rho_{k,max}$) ve optimum su içeriklerinin (w_{opt}) değişimi incelenmiştir. Proctor deneyi sonuçlarına göre oluşturulan 50 mm çap ve 100 mm yüksekliğe sahip silindirik numuneler 7, 14 ve 28 gün kür edildikten sonra serbest basınç (UCS) ve ultrasonik titreşim hızları incelenmiştir. Çalışmanın son aşamasında ise yüksek plastisiteli killerin atıksu çamuru külü ve kireçle stabilizasyonunun kür süresi, katkı oranı ve katkı türünün numuneler üzerindeki tahribatlı ve tahribatsız yöntemlerle mukavemet ve rijitlik özelliklerinin yanı sıra sıkıştırma özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

3.1 Kompaksiyon Deneyleri

Çalışma kapsamında 6 çeşit karışım hazırlanıp notasyonları belirlenmiştir. Hazırlanan karışımların optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluklarının belirlenebilmesi için her karışımdan 5 adet olmak üzere toplamda 30 adet standart Proctor deneyi yapılmıştır. Kompaksiyon deneyi sonucu elde edilen maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriklerinin değişimi sırasıyla Şekil 3.1 ve 3.2’de verilmiştir. Şekil 3.1 ve 3.2 incelendiğinde karışımlarda kireç oranı arttıkça optimum su içeriğinin arttığı, maksimum kuru yoğunluk değerlerinin azaldığı görülmüştür.



Şekil 3.1: Katkı Türü ve Oranına Bağlı Olarak Optimum Su İçeriği Değişimi

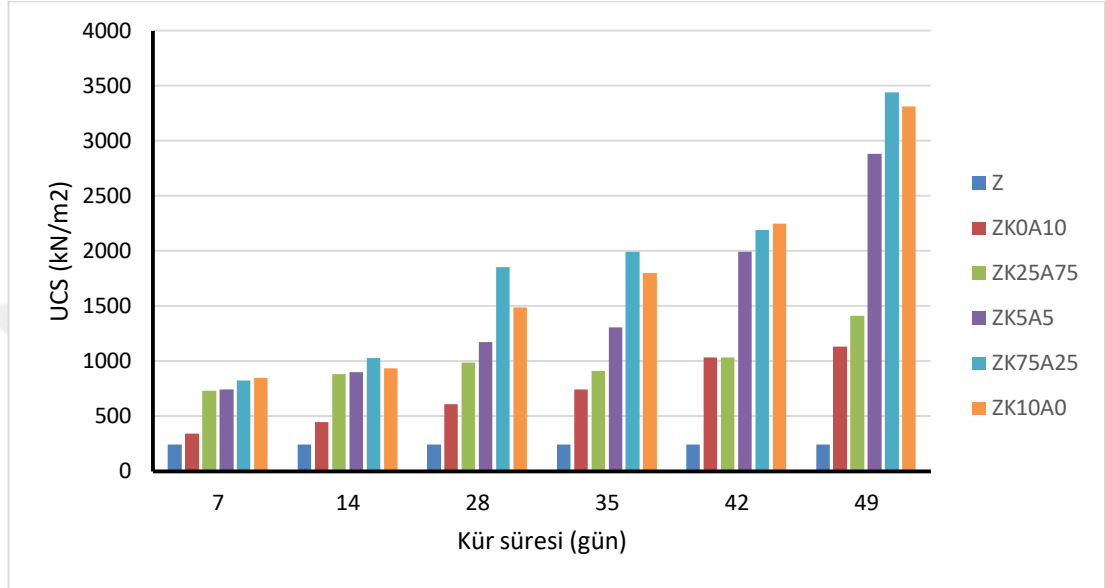


Şekil 3.2: Katkı Türü ve Oranına Bağlı Olarak Maksimum Kuru Yoğunluk Değişimi

3.2 Serbest Basınç Deneyleri

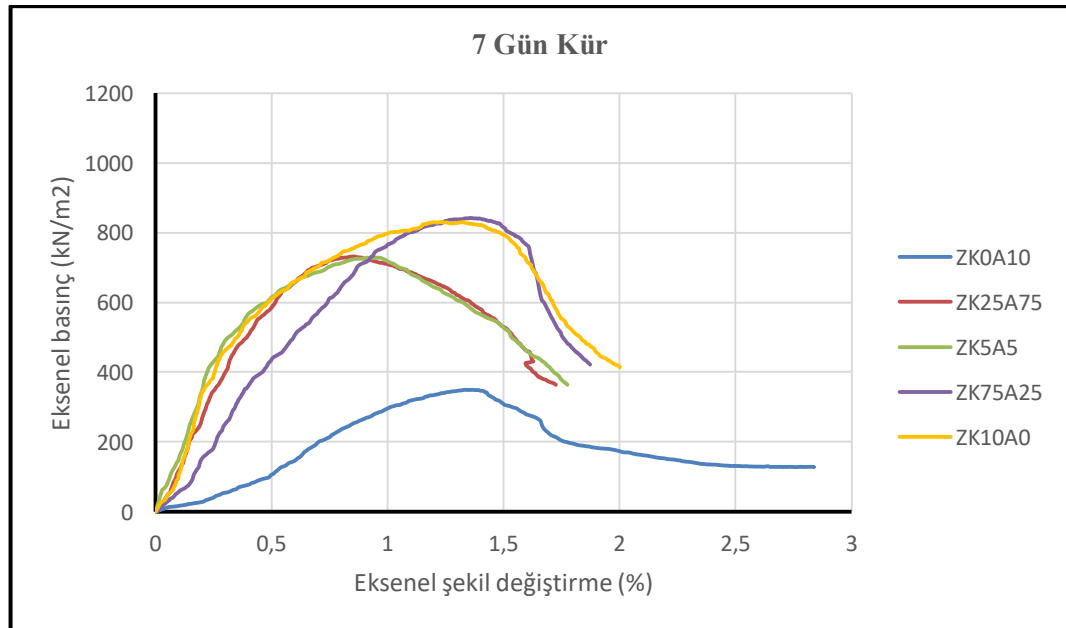
Tez çalışması kapsamında Tokat ili Erbaa ilçesinden elde edilen yüksek plastisiteli kil zemine toplamda %10 katkı oranları içerecek şekilde 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde numuneler oluşturulmuştur. Numunelerde katkı olarak sadece kireç, AÇK ve farklı kireç-AÇK kombinasyonları kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler sırasıyla 7, 14, 28, 35, 42 ve 49 gün süreyle desikatörde kür'e maruz bırakılmıştır. Kür sonrası yapılan serbest basınç deneyleri (UCS) Şekil 3.3'te verilmiştir. Şekil incelendiğinde beklenildiği üzere kür süresinin artışına bağlı olarak numunelerin UCS değerleri artmıştır. Katkı oran ve tipleri incelendiğinde özellikle 14 gün sonrası

en yüksek dayanım %7.5 Kireç+%2,5 AÇK içeren (ZK75A25) numunelerden elde edilmiştir. ZK75A25 numunelerinin mukavemet artışları özellikle 28 gün sonrasında daha yüksek oranlarda olduğu görülmüştür. Saf kül içeren numunelerde saf zemine oranla UCS değerlerinde artışlar gözlemlense de kireçle beraber kullanıldığında daha etkin bir stabilizasyon malzemesi olduğu görülmüştür.

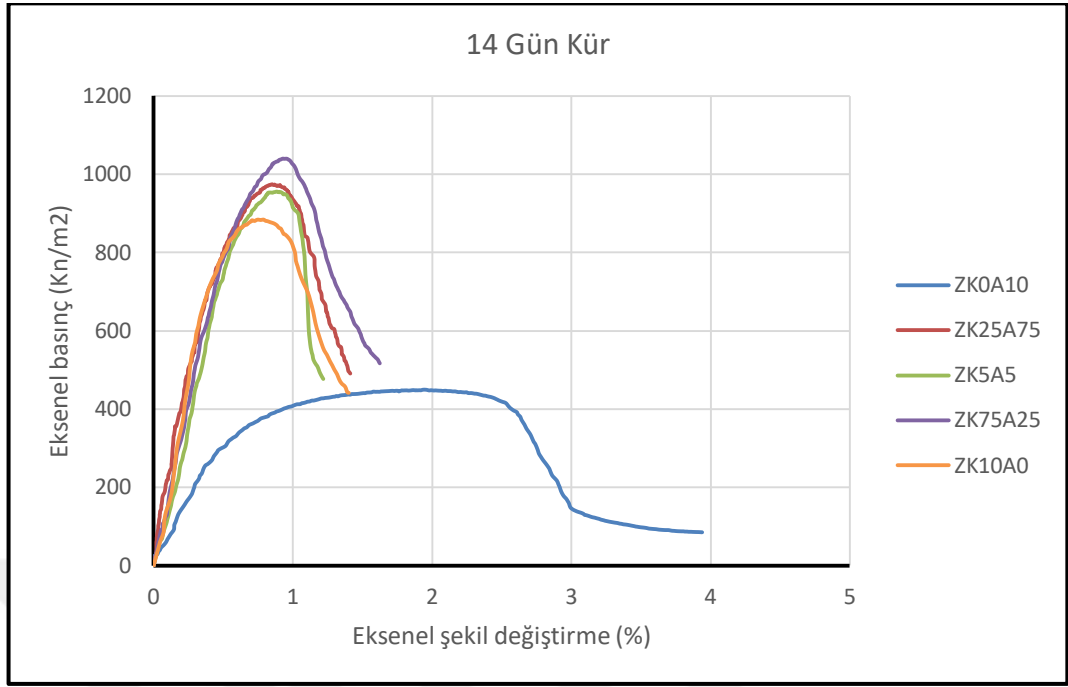


Şekil 3.3: Kür Süresine Bağlı Olarak UCS Değerlerinin Değişimi

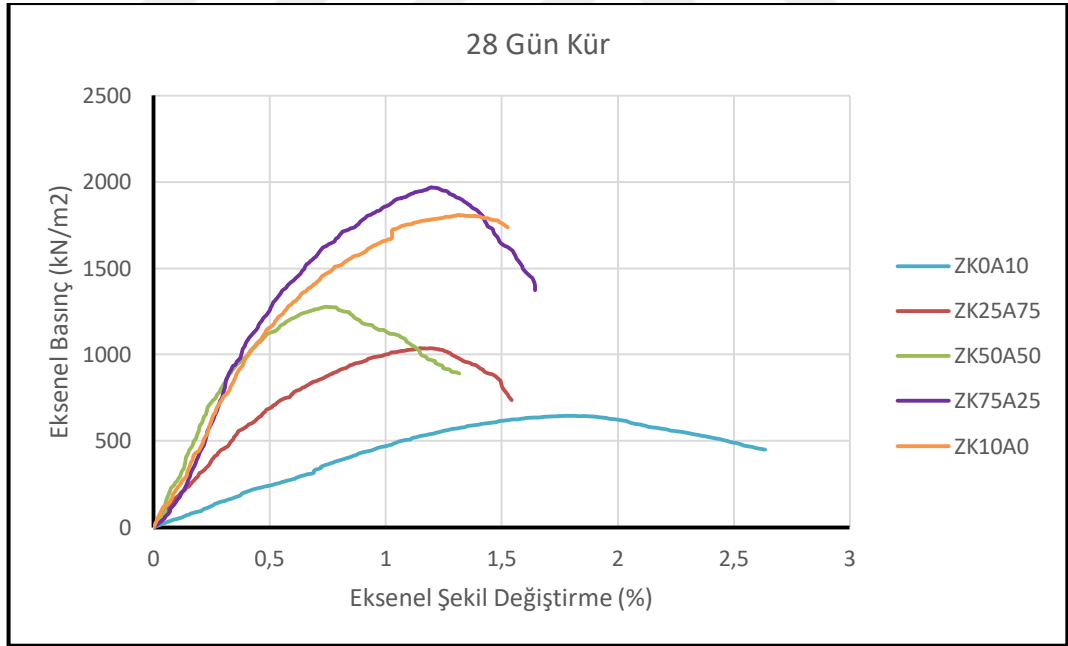
7, 14 ve 28 gün kür süresine bağlı olarak seçilen bazı numunelere ait Eksenel Basınç-Eksenel Şekil Değiştirme grafikleri sırasıyla Şekil 3.4, 3.5 ve 3.6 da verilmiştir.



Şekil 3.4: 7 Gün Kür İçin UCS Deney Sonuçları



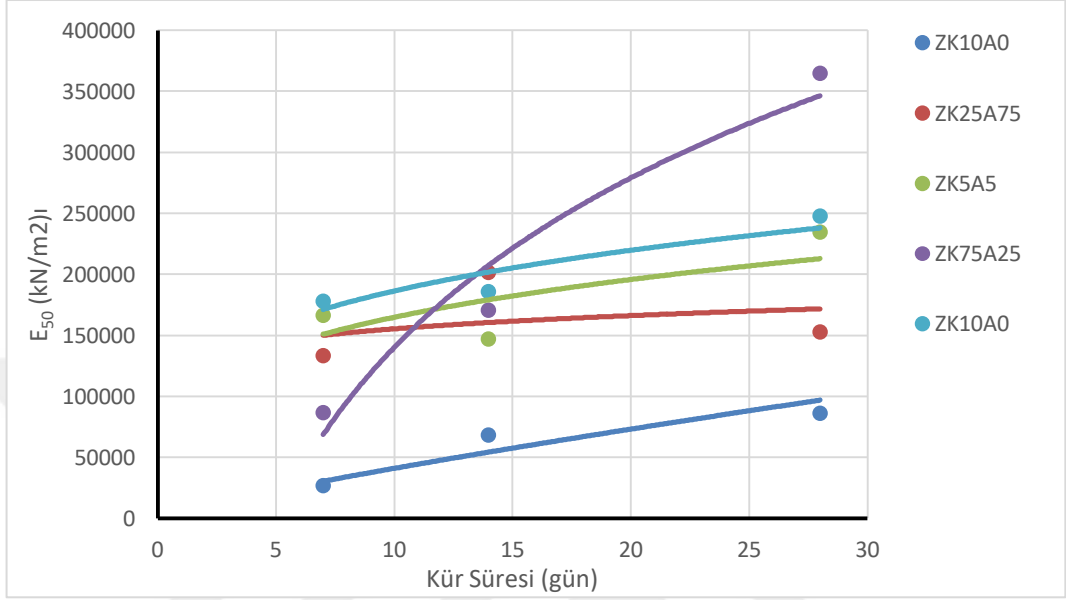
Şekil 3.5: 14 Gün Kür İçin UCS Deney Sonuçları



Şekil 3.6: 28 Gün Kür İçin UCS Deney Sonuçları

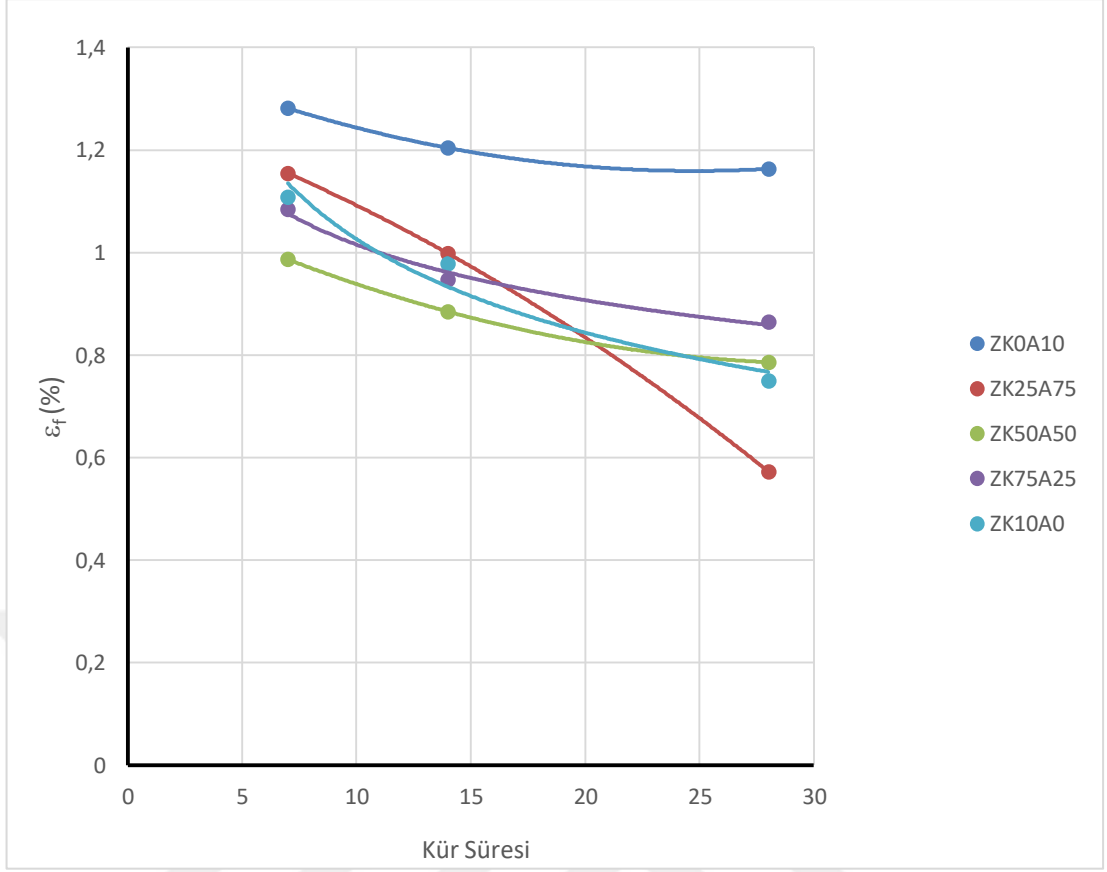
Tez çalışması kapsamında AÇK ve kireç ile stabilize edilen numunelerin kür süresine bağlı olarak rijitlik özelliklerinin değişimi de incelenmiştir. Bu amaçla serbest basınç mukavemetinin %50'sine denk gelen eksenel basınç değerinin, bu değere karşılık gelen eksenel şekil değiştirme değerine bölünmesi ile elde edilen elastisite modülleri

(E50) karşılaştırılmıştır. Şekil 3.4, 3.5 ve 3.6'da görülen deney sonuçlarına bağlı olarak E50 değerlerinin değişimi şekil 3.7'de verilmiştir. Şekil 3.7 incelendiğinde numunelerdeki kireç içeriği ve kür süresinin artışına bağlı olarak rijitliğin de arttığı görülmüştür.



Şekil 3.7: E₅₀ Değerinin Kür Süresi ve Katkı Türüne Göre Değişimi

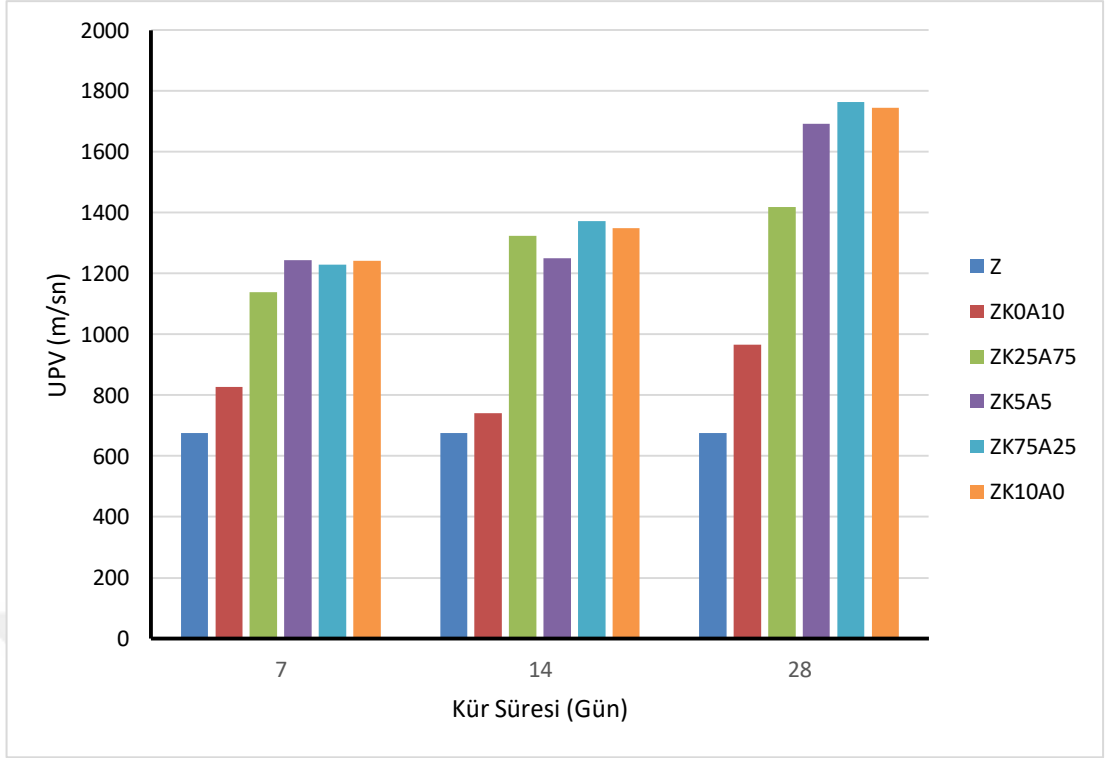
Ayrıca stabilize edilmiş numunelerin kırılma anındaki şekil değiştirmeleri de karşılaştırılarak numunelerin malzeme davranışı hakkında bir değerlendirme yapılmıştır. Kırılma anındaki şekil değiştirme mertebelerinin katkı türü, oranı ve kür süresine bağlı olarak değişimi Şekil 4.8'de verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde kireç oranı arttıkça numunelerin daha gevrek bir kırılma davranışı gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca kür süresi arttıkça kırılma anındaki şekil değiştirme (ϵ_f) mertebelerinin azaldığı görülmüştür. Başka bir deyişle kür süresi arttıkça numuneler daha gevrek bir davranışa sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 3.8: ϵ_f Değerinin Kür Süresi ve Katkı Türüne Göre Değişimi

3.3 Ultrasonik Titreşim Hızı Deneyleri

Tez çalışması kapsamında AÇK ve kireçle stabilize edilmiş killi zeminlerin tahribatsız bir deney yöntemi olan Ultrasonik titreşim deneyleri ile belirlenmiştir. Şekil 3.9'da yapılan tahribatsız deneyler sonucu elde edilen UPV hızlarının katkı oranı ve kür süresine bağlı olarak değişimi Şekil 3.9'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde serbest basınç deney sonuçlarına paralel olarak en yüksek UPV hızı ZK75A25 numunelerinde 14 ve 28 gün kür sürelerinde ölçülmüştür. Ancak ölçülen değerler arası farklılıklar oldukça az miktarda olduğu görülmüştür. Kireç oranının %5 ve üzeri olan numunelerde UPV değerlerinin ciddi bir şekilde arttığı görülmüştür.



Şekil 3.9: UPV Hızlarının K r Süresi ve Katkı Türüne Göre Değişimi

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1 Sonuç

Yüksek plastisiteli killerin atıksu çamuru külü ve kireçle stabilizasyonunu konu alan yüksek lisans tezinde kür süresi, katkı oranı ve türünün numunelerin mukavemet ve rijitlik özelliklerinin yanı sıra sıkıştırma özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Çalışma sonrası aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Numunelerdeki kireç oranının artış optimum su içeriklerinde (w_{opt}) artış, maksimum kuru yoğunluk ($\rho_{k,max}$) değerlerinde ise azalmaya neden olmuştur.
- Kür süresindeki artış numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde artışı beraberinde getirmiştir.
- Genel olarak bakıldığında saf zeminin mukavemetinde en çok artış oluşturan katkı kombinasyonu %7.5 kireç ve %2.5 AÇK içeren ZK75A25 notasyonlu numunelerde görülmüştür. Bu karışımın etkinliği kür süresi arttıkça daha belirgin hale gelmiştir. Örneğin 7 gün kür sonucu serbest basınç mukavemeti değeri, saf zemine göre 2.44 kat artarken 28 gün için 6.73, 49 gün kür için 13 kattan fazla artışlar gözlemlenmiştir.
- Serbest basınç deney sonuçlarından elde edilen E50 elastisite modülü değerleri karşılaştırıldığında kireç oranı ve kür süresinin artmasının numuneleri daha rijit bir hale getirdiği görülmüştür.
- Kırılma anındaki aksenal şekil değiştirme mertebeleri karşılaştırıldığında kireç oranı arttıkça numunelerin daha gevrek bir kırılma sergilediği görülmüştür. Kür süresi arttıkça ε_f değerinin azaldığı görülmüştür. Bu azalmanın kireç içeren numunelerde daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sadece AÇK ile stabilize edilen numunelerde ε_f değerindeki azalma oranı %10 mertebelerinde iken %10 kireç içeren numunelerde bu oran %50 mertebelerine çıkmaktadır. Diğer bir ifadeyle AÇK içeren numunelerin kırılma davranışı kür süresine daha az bağlıdır.

- AÇK ve kireçle stabilize edilmiş numunelerin ultrasonik hız ölçümleri karşılaştırıldığında serbest basınç deneyleri sonuçlarına paralel olarak, kür süresi arttıkça UPV değerlerinin arttığı, en yüksek UPV ölçümlerinin ZK75A25 notasyonlu numunelerden alındığı görülmüştür. UPV değerlerindeki artışların %5 ve üzeri kireç oranlarında daha belirgin olduğu görülmüştür.

4.2 Öneriler

Elde edilen sonuçlar ışığında son yıllarda oldukça önemli bir konu haline gelen AÇK'nın etkin bir şekilde bertaraf edilebilmesi için problemlerli zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilme potansiyelinin olduğu görülmüştür. Ancak AÇK'nın stabilizasyon amaçlı kullanılabilmesi için detaylı durabilite, dinamik yükler altında davranış, mikroyapısal incelemelerden geçirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Ayrıca AÇK'nın zemin stabilizasyonunda kullanıldığında herhangi bir çevresel problem oluşturmayacağına dair çalışmaların da yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Mahmutluoğlu, B., ve Bağriağık, B.** (2020). Killi Zeminlerin Donma-Çözölme Davranışlarında Cam Atık Çamurunun Etkisi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Faköltesi Dergisi, 35(3), 783-796.
- [2] **Dean, R. B., ve Suess, M. J.** (1985). The risk to health of chemicals in sewage sludge applied to land. Waste Management & Research, 3(3), 251-278.
- [3] **Güllü, H., ve Fedakar, H. İ.** (2017). Response surface methodology for optimization of stabilizer dosage rates of marginal sand stabilized with Sludge Ash and fiber based on UCS performances. KSCE Journal of Civil Engineering, 21, 1717-1727.
- [4] **Şadoğlu, E., ve Çalık, Ü.** (2020). Permeability of high plasticity clayey soil stabilized with lime and perlite. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35(2), 551-561.
- [5] **Tunç A.,** Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, Ankara, 2002.
- [6] **Çalık, Ü.** (2012). 'Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireç İle Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı'. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı. Doktora Tezi. Trabzon.
- [7] **Önalp, A. ve Sert, S.,** 2006. Geoteknik Bilgisi III - Bina Temelleri, Birsen Yayınevi, İstanbul, 206-243
- [8] **Demiröz, A., ve Karaduman, M.** (2009). 'Zemin İyileştirme Metotları'. Selçuk Teknik Dergisi, 8(3), 176-192.
- [9] **Özaydın, K.,** Zemin Mekaniği, İstanbul, Birsen Yayınevi, 261s, 2005.
- [10] **Akyüz, İ.** (2009). Donatılı ve Donatısız Zemin Güçlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması/The Comparison Between Reinforced And Unreinforced Soil Stabilization Methods. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, şanlıurfa.
- [11] **Öztürk, E.,** (2006). Adapazarı Ovasındaki Zeminlerin Genel Dağılımı ve Uygun Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Belirlenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 196s.
- [12] **Erdik, M., Selçuk, E.M ve İlki, A.** (2014), 'Güçlendirme ve Yeniden Yapım Çalışmaları' İstanbul. Adres: <https://www.guvenliyasam.org/wp-content/uploads/2016/02/GUCLENDIRME.pdf>
- [13] **Öztürk, T.,** (2006). 'Dinamik Yüklü Betonarme Temellerin Güçlendirilmesi'. İTÜ İnşaat Faköltesi Yapı Anabilim Dalı, İstanbul.

- [14] **Tunç A.** (2001). ‘Yol Malzemeleri ve Uygulamaları’. 262-264, 541-550s. İstanbul.
- [15] **Yıldırım, S.** (2019). Ferrokrom cürufunun karayolu alt dolgularında kullanılabilirlik performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi (Master's thesis, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi).
- [16] **Aydın, S.** (2010). Yenikent (Ankara) yerleşim Alanı Killerinin Kireç Ve Uçucu Külle Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi. (Yüksek Lisans Tezi). Ankara: Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [17] **Bıçakçı, M.** (2022). ‘Kireç ile Orta Plastisiteli Kil Zemin İyileştirilmesi’. T.C. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü., Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- [18] **Garaisayev, S.** (2008). Şişen Zeminlerin Kimyasal Yöntemlerle Stabilizasyonu. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul: İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [19] **Selçukhan, O., & Ekinci, A.** (2021). Zemin iyileştirme yöntemleri ve yaygın kullanımına bağlı değerlendirilmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (23), 481-496.
- [20] **Akyarlı, A., Kavak, A., Atay, S., ve Alkaya, S.** (2009). Killi Zeminlerin Kireç ile İyileştirilmesi. TSE Standart Dergisi, İzmir.
- [21] **Işık., A.** (2014). ‘Sıkıştırılmış Zeminlerde Donma-Çözülme Olayının Deneysel İncelenmesi’. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul.
- [22] **Brandl, H.** (2008). Freezing-Thawing behaviour of soils and unbound road layers. Slovak Journal of Civil Engineering, Vol. 3, Sf. 4-12.
- [23] **Ing, D. S., Chin, S. C., Guan, T. K., & Suil, A.** (2016). The use of sewage sludge ash (SSA) as partial replacement of cement in concrete. ARPN J. Eng. Appl. Sci, 11(6), 3771-3775.
- [24] **Fontes, C. M. A., Barbosa, M. C., Filho, R. D. T. and P, G. J.** 2004. Potentiality of Sewage Sludge Ash as Mineral Additive in Cement Mortar and High Performance Concrete, Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, November 2004, Barcelona.
- [25] **Yip, W. and Tay, J.** 1990. Aggregate Made from Incinerated Sludge Residue. Journal of Materials in Civil Engineering, 2(2), 84-93.
- [26] **Kütük, M. A., & Oğuz, Z. A.** (2015). Atık Su Arıtma Çamur Külü Katkısının Kompozit Malzeme Mekanik Özelliğine Etkisi.
- [27] **Akbulut, N.** (2020). ‘Use of Sewage Sludge Ash For Soil Improvement’. Hasan Kalyoncu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tez Çalışması, Gaziantep
- [28] **Özer, M. ve Orhan, M.** (2007). Lazer Kırınım Yöntemiyle Zeminlerin Tane Büyüklüğü Dağılımının Belirlenmesi: Genel İlkeler ve Örnek Hazırlama Yöntemi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 22/ 2, 217-226.

- [29] **Bayan S. Al-Nu'man, Bestoon R. Aziz, Sabr A. Abdulla, Sirwan E. Khaleel.** 2015. Compressive strength formula for concrete using ultrasonic pulse velocity, *Int. J. Eng. Trends. Technol. (IJETT)* 26 (1), 9–13.
- [30] **Kurtuluş, C., Bozkurt, A.** 2011. Determination of concrete compressive strength of the structures in Istanbul and Izmit Cities (Turkey) by combination of destructive and non-destructive methods, *Int. J. Phys. Sci.* 6 (16), 4044–4047.
- [31] **Watanabe S, Hishikawa K, Sonoda S, Namiki S.** 2015. Study on estimation for compressive strength of concrete by ultrasonic method. *J Struct Constr Eng.* 715, 1375-1383.
- ASTM-D422-63.** Standard test method for Particle-Size Analysis of Soils. 2014.
- ASTM-D698-12.** Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristic of Soil Using Standard Effort. 2014
- ASTM-D2166/D2166M-13.** Standard test method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. 2013
- ASTM-D4318-10.** Standard test method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. 2014
- ASTM-D854-14.** Standard test methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. 2014
- ASTM C597-16 (2016).** Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. 2016

ÖZGEÇMİŞ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü (2005-2009)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2010 Eylül - 2014 Mart Erbaa Belediyesi Su ve Kanalizasyon Müdürlüğü, Müdür Vekili. (Kanalizasyon, yağmursuyu, içme suyu hizmetleri ile atıksu arıtma tesisi ile ilgili işlerin yürütülmesi)
- 2014 Mart – 2019 Mart Erbaa Belediyesi İmar ve Şehircilik Müdürlüğü, Kontrol Mühendisi. (3194 sayılı İmar Kanunu kapsamında ruhsatlı, ruhsat ve eklerine aykırı ve ruhsatsız binalara ait her türlü denetim işlemlerini yürütür ve yasal işlemleri yapar.)
- 2019 Nisan – 2020 Nisan Erbaa Belediyesi Fen İşleri Müdürlüğü, Müdür Vekili. (İlçe sınırları içerisinde belediyenin sorumluluğunda olan yolların açılması ve açılan yolların ihtiyaca binayen asfalt, parke veya sathi kaplama uygulaması olarak düzenlenmesi.)
- 2020 Nisan – 2023 Şubat Erbaa Belediyesi Su ve Kanalizasyon Müdürlüğü emrinde Müdür Vekili olarak çalışmaya devam etmekteyim.