



**YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİN
STABİLİZASYONUNDA UÇUCU KİL
DANE BOYUTUNUN CBR VE DAYANIMA ETKİSİ**

Emre GENÇOĞLU

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ
2022**

(Her Hakkı Saklıdır)

**T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİN STABİLİZASYONUNDA
UÇUCU KÜLDANE BOYUTUNUN CBR VE DAYANIMA ETKİSİ**

(The Effect of Fly Ash Grain Size on CBR and Strength in
High Plasticity Clayey Soil Stabilization)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre GENÇOĞLU

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ

BAYBURT

Ocak, 2022

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ danışmanlığında, 182004011 numaralı Emre GENÇOĞLU tarafından hazırlanan “Yüksek Plastisiteli Kil Zemin Stabilizasyonunda Uçucu Kül Dane Boyutunun CBR ve Dayanıma Etkisi” adlı bu tez çalışması 19/01/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU	<i>İmza:</i>
Jüri Üyesi	: Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper KAMILOĞLU	<i>İmza:</i>
Jüri Üyesi	: Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ	<i>İmza:</i>

Bu tezin Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

19/01/2022

Doç. Dr. Fatih GÜRBÜZ
Enstitü Müdürü

ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Yüksek Plastisiteli Kil *Zemin Stabilizasyonunda Uçucu Kül Dane Boyutunun CBR ve Dayanıma Etkisi*” başlıklı çalışmanın tarafımdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını ve yararlandığım eserleri kaynakçada gösterdiğimi beyan ederim.

19/01/2022

Emre GENÇOĞLU

TEŞEKKÜR

“Yüksek Plastisiteli Kil Zemin Stabilizasyonunda Uçucu Kül Dane Boyutunun CBR ve Dayanıma Etkisi” isimli yüksek lisans tez çalışması Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda hazırlanmıştır.

Çalışmam süresince her türlü yardımı benden esirgemeyen, çalışmamın tamamlanması için gereken bilgi, beceri ve tecrübeleri kazanmam konusunda her türlü katkıyı sunan çok kıymetli meslek büyüğüm, hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ’ a; teşekkürlerimi arz ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince yardımını, desteğini her zaman yanımda hissettiğim sevgili dostum Dr. Öğr. Gör. Yıldray KURNAZ’a ve Öğr. Gör. Yüksel Furkan YILDIRIM’a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın laboratuvar deneyleri süreçlerinde bilgi, tecrübe ve laboratuvar imkânlarının kullanmam noktasında yardımlarını sakınmayan Kars DSİ 24. Bölge Müdürlüğü Kalite Kontrol ve Laboratuvar Şube Müdürlüğü çalışanlarına; Kars KGM 18. Bölge Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme çalışanlarına şükranlarımı sunarım.

Gerek polis gerek inşaat mühendisi olmamda ve hayatım boyunca maddi, manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, güçlerini ve yardımlarını her zaman yanımda hissettiğim babam Namık GENÇOĞLU, annem Birgül GENÇOĞLU ve kardeşim Ergin GENÇOĞLU’ na, hayatlarımızı birleştirdiğimiz andan itibaren ve yüksek lisans tez çalışmam boyunca ilgi, destek ve özverisini hiçbir zaman benden sakınmayan kıymetli eşim Sevilay GENÇOĞLU’na ve canım oğlum Ertuğrul’a sevgi, saygı ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİN STABİLİZASYONUNDA
UÇUCU KÜL DANE BOYUTUNUN CBR VE DAYANIMA ETKİSİ

Emre GENÇOĞLU

Ocak 2022, 47 Sayfa

Zemin stabilizasyonunu genel olarak derin ve yüzeysel stabilizasyon olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Yüzeysel stabilizasyon uygulamalarından biri kimyasal stabilizasyondur. Kimyasal zemin stabilizasyonunda inceliğin etkisini incelemeyi amaçlayan bu çalışma kapsamında, yüksek plastisiteli kil bir zeminin mühendislik özellikleri uçucu kül kullanılarak iyileştirilmiştir. Uçucu kül termik santralden alındığı haliyle ve inceltirilmiş (öğütülmüş) olarak zemine ayrı ayrı ilave edilmiştir. Uçucu kül zemine %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında hem ham hem de öğütülmüş olmak üzere ilave edilerek CBR ve dayanım verileri incelenmiştir. Çalışma sürecinde serbest basınç deneyleri için kür süreleri 7 ve 28 gün olarak belirlenmiştir.

Kıvam limitleri, kompaksiyon, CBR ve serbest basınç dayanımı deneylerinin gerçekleştirildiği bu çalışma sonucunda uçucu külün inceltirerek zemin stabilizasyonunda kullanılmasının kompaksiyon parametrelerindeki etkisinin sınırlı olduğu, kıvam limitleri üzerinde nispeten etkin olduğu, CBR ve dayanım değerlerinde ise çok yüksek artışlar meydana getirdiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında yüksek plastisiteli kil bir zeminde daha ince uçucu kül katkısıyla daha yüksek CBR ve dayanım verilerine ulaşılabilecek stabilizasyon çalışmalarının yapılabileceği kanaatine varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Zemin stabilizasyonu, incelik etkisi, CBR, serbest basınç dayanımı, uçucu kül.

ABSTRACT

MASTER THESIS

THE EFFECT OF FLY ASH GRAIN SIZE ON CBR AND STRENGTH IN HIGH PLASTICITY CLAYEY SOIL STABILIZATION

Emre GENÇOĞLU

January 2022, 47 Pages

Soil stabilization can be divided into two as deep and surface stabilization. One of the surface stabilization application is chemical stabilization. In this study, which aims to examine the effect of fineness on chemical soil stabilization, the engineering properties of a high plasticity clayey soil were improved by using fly ash. Fly ash was added to the soil separately as it was taken from the thermal power plant and in a fine (grinded) form. CBR and strength data were investigated by adding fly ash to the soil at the rates of 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, both raw and grinded. Curing times were determined as 7 and 28 days for the unconfined compressive strength tests during the study period.

As a result of this study, in which consistency limits, compaction, CBR and unconfined compressive strength tests were carried out, it was determined that the use of fly ash by thinning in soil stabilization had a limited effect on compaction parameters, was relatively effective on consistency limits, and resulted in very high increases in CBR and strength values. In the light of these results, it was concluded that stabilization studies can be carried out on a high plasticity clayey soil with the addition of finer fly ash, which can reach higher CBR and strength data.

Keywords: Soil stabilization, fineness effect, CBR, unconfined compressive strength, fly ash.

ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI	i
TEŞEKKÜR	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER	v
TABLolar DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
BİRİNCİ BÖLÜM	1
Giriş	1
İKİNCİ BÖLÜM	3
Kuramsal Çerçeve	3
Zemin İyileştirme Metotları	3
Mekanik stabilizasyon	4
Kimyasal stabilizasyon	5
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	9
Materyal ve Yöntem	9
Materyal	9
Yöntem	12
Kıvam limitleri	12
Kompaksiyon deneyi	14
Kaliforniya taşıma oranı deneyi (CBR)	16
Serbest basınç deneyi	17
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM	19
Araştırma Bulguları	19
Kıvam limit deneyleri sonuçları	19
Kompaksiyon deneyleri sonuçları	22
Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri sonuçları	24
Serbest basınç deneyi sonuçları	26
BEŞİNCİ BÖLÜM	34
Sonuçlar ve Öneriler	34
Kaynakça	36

EKLER	40
EK-1: Kompaksiyon Deney Sonuçları	40
ÖZ GEÇMİŞ	47



TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. <i>Hazırlanan Numunelere Ait Notasyonlar</i>	10
Tablo 2. <i>Zeminin Mühendislik Özellikleri</i>	10
Tablo 3. <i>Uçucu Küllerde Kimyasal, Fiziksel Özellikler</i>	11
Tablo 4. <i>Numunelerin Kıvam Limit Deney Sonuçları</i>	19
Tablo 5. <i>Numunelerin Kompaksiyon Deney Sonuçları</i>	22
Tablo 6. <i>CBR Deneyi Parametreleri</i>	24
Tablo 7. <i>Numunelerin Tek Eksenli Serbest Basınç Dayanımları</i>	26



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Zeminlerde stabilizasyon tekniklerinin uygulanabilirliği	2
Şekil 2. Zeminler için stabilizasyon teknikleri	3
Şekil 3. Doğal malzemenin alındığı yerin konumu	9
Şekil 4. Plastisite kartı	11
Şekil 5. İnce ve iri daneli uçucu külde granülometri eğrisi	12
Şekil 6. Likit limit deneyi yapım aşamaları	13
Şekil 7. Casagrande deney aleti ve oluk açma bıçağı tarafından ikiye bölünen numune	14
Şekil 8. Plastik limit deney numunelerinin hazırlanması	14
Şekil 9. Proctor deney cihazı(otomatik) ve kontrol–gösterge paneli	15
Şekil 10. Proktor deneyi yapım aşamaları	16
Şekil 11. CBR deney cihazı ile CBR deney kalıbı ve yük diski	16
Şekil 12. Hazırlanan ve havuzda bekletilen numune ile havuzdaki numunenin komparatör saatiile takip edilmesi	17
Şekil 13. CBR cihazından alınan değerlerin okunması	17
Şekil 14. Serbest basınç deneyi düzeneği	18
Şekil 15. Serbest basınç deney numunelerinin hazırlanma aşamaları	18
Şekil 16. Numunelerin likit limitleri	20
Şekil 17. Numunelerin plastik limitleri	21
Şekil 18. Numunelerin plastisite indisleri	21
Şekil 19. Numunelerin maksimum kuru yoğunlukları	23
Şekil 20. Numunelerin optimum su içerikleri	23
Şekil 21. Numunelerin CBR değerleri	25
Şekil 22. Numunelerin CBR şişme sonuçları grafiği	26
Şekil 23. ZUKİ numunelerinin 7 günlük serbest basınç deney sonuçları	27
Şekil 24. ZUK numunelerinin 7 günlük serbest basınç deney sonuç	28
Şekil 25. ZUKİ numunelerinin 28 günlük serbest basınç deney sonuçları	29
Şekil 26. ZUK numunelerinin 28 günlük serbest basınç deney sonuçları	30
Şekil 27. ZUKİ numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç deneyi karşılaştırmalı grafiği	30
Şekil 28. ZUK numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç deneyi karşılaştırmalı grafiği	31
Şekil 29. ZUK ve ZUKİ numunelerinin 7 günlük serbest basınç deneyi karşılaştırmalı grafiği	32
Şekil 30. ZUK ve ZUKİ numunelerinin 28 günlük serbest basınç deneyi	

karşılaştırmalı grafiği	32
Şekil 31. Doğal zeminin kompaksiyon eğrisi	40
Şekil 32. ZUKİ5 numunesinin kompaksiyon eğrisi	40
Şekil 33. ZUKİ10 numunesinin kompaksiyon eğrisi	41
Şekil 34. ZUKİ15 numunesinin kompaksiyon eğrisi	41
Şekil 35. ZUKİ20 numunesinin kompaksiyon eğrisi	42
Şekil 36. ZUKİ25 numunesinin kompaksiyon eğrisi	42
Şekil 37. ZUKİ30 numunesinin kompaksiyon eğrisi	43
Şekil 38. ZUK5 numunesinin kompaksiyon eğrisi	43
Şekil 39. ZUK10 numunesinin kompaksiyon eğrisi	44
Şekil 40. ZUK15 numunesinin kompaksiyon eğrisi	44
Şekil 41. ZUK20 numunesinin kompaksiyon eğrisi	45
Şekil 42. ZUK25 numunesinin kompaksiyon eğrisi	45
Şekil 43. ZUK30 numunesinin kompaksiyon eğrisi	46

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

%	: Yüzde
A	: Alan
Al	: Alüminyum
Al₂O₃	: Alüminyum(III) Oksit
Ca	: Kalsiyum
CaO	: Kalsiyum Oksit (Sönmemiş Kireç)
Cl	: Klor+
CL	: Düşük Plastisiteli İnorganik Kil
CH	: Yüksek Plastisiteli İnorganik Kil
cm	: Santimetre
cm²	: Santimetrekare
cm³	: Santimetreküp
D	: Dane Çapı
Fe₂O₃	: Demir(III) Oksit
gr	: Gram
Km	: Kilometre
Kg	: Kilogram
kPa	: Kilopaskal (kN/m ²)
K₂O	: Potasyum Oksit
LL	: Likit Limit
Lt	: Litre
m	: Metre
m²	: Metrekare
m³	: Metreküp
mm	: Milimetre
Mg	: Magnezyum
MgO	: Magnezyum Oksit
MH	: Yüksek Plastisiteli İnorganik Silt
ML	: Düşük Plastisiteli İnorganik Silt
Na	: Sodyum
Na₂O	: Sodyum Oksit
OH	: Hidroksit
PI	: Plastisite İndisi

PL	: Plastik Limit
SiO₂	: Silisyum Dioksit
SO₃	: Kükürt Trioksit
s	: Saniye
W_{opt}	: Optimum Su İçeriği
w	: Su Muhtevası
°C	: Santigrad Derece
ρ_k	: Kuru Birim Ağırlık
ρ_{kmax}	: Maksimum Kuru Birim Ağırlık

Kısaltmalar

AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
AR-GE	: Araştırma Geliştirme
ASCE	: Amerika İnşaat Mühendisleri Derneği
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
CBR	: Kaliforniya Taşıma Oranı
TS	: Türk Standartları
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi

BİRİNCİ BÖLÜM

Giriş

Zemin kavramını kaya yapıların kimyasal, mekanik olarak ayrışmaları akabinde meydana gelmiş katı daneleri ve bu katı daneler arasında bulunan su, hava içeren boşluk kısımların oluşturduğu yer yüzeyinin en dış kısmını teşkil eden, içerisinde organik durumdaki maddeleri barındıran doğal malzeme bütünü şeklinde tanımlamak mümkündür (Tunç, 2002).

Hidrolik ve mekaniğin barındırdığı ilkeler çerçevesinde zemin davranış durumlarını araştırıp ortaya koyan bilim dalı ifadesi zemin mekaniği olarak tanımlanabilir. Zemin mekaniği özetle hem hidrolik hem de mekanikle alakalı kuralların çerçevesinde zemin davranış durumlarını bilimsel olarak inceler (Taş, 2020).

Zemin stabilizasyonu yapılması düşünülen, planlanan mühendislik yapısının oturtulacağı zeminin bilinen bazı niteliklerinin değişik biyolojik, kimyasal, fiziksel uygulamalar ile iyileştirilmesi şeklinde ifade edilebilir (Özaydın, 2012).

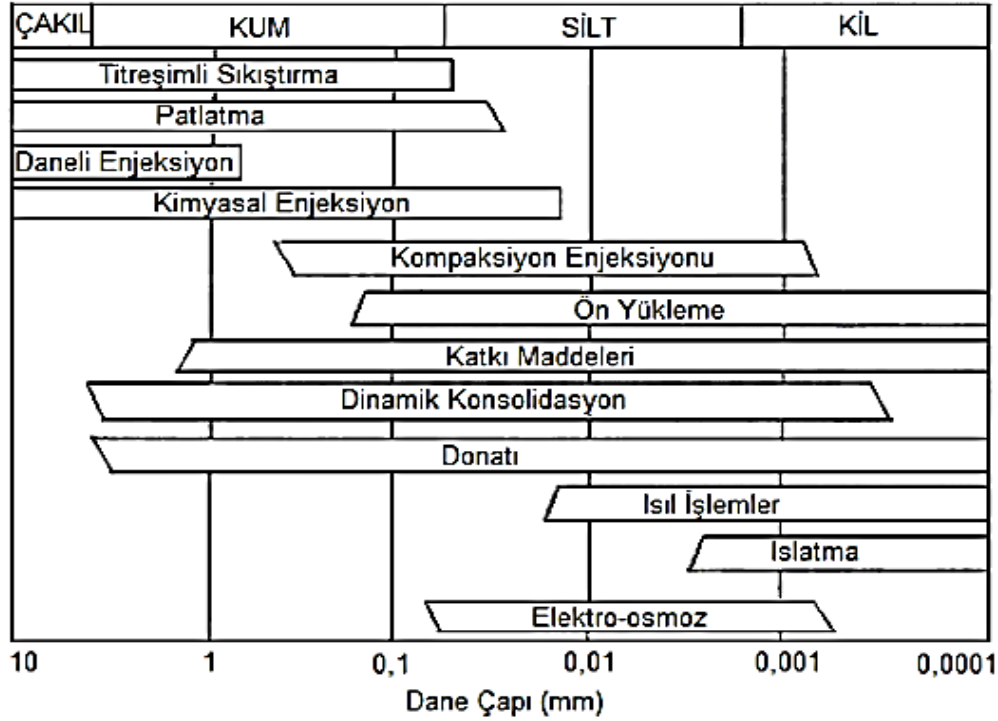
Önalp, çalışmasında stabilizasyon tanımını zeminin içeriğinde var olan özelliğin arzu edilen özelliğe ulaştırılması işlemi olarak açıklamaktadır (Önalp,1983).

Bir diğer ifadeyle zemin stabilizasyonu; zeminlerin mühendislik açısından bilinen özellik ve durumlarının bazı teknikler vasıtasıyla ıslah edilerek geliştirilmesidir.

Mühendislik yapı inşası bakımından kullanışlı olmadığı anlaşılan, uygun bulunmayan zeminler için değişik bazı çözümleri dört başlık altında sıralayabiliriz.

- İnşa edilecek mühendislik yapısının projesini ıslah edilmemiş bir zemin gibi düşünerek oluşturmak ya da bu yapıyı yerinin değişikliği suretiyle başka bir yerde oluşturmak.
- Üzerine mühendislik yapısı inşa edilecek zayıf olarak nitelendirilen zemini, dayanım değerleri daha fazla olan başka bir zemin ile değiştirmek.
- Zayıf mühendislik özelliklerine sahip zeminin daha altına inilerek, yapının temel kısmını dayanıklı bir zemin tabakasında oluşturmak.
- Zemini ıslah ederek stabilizasyonunu sağlamak (Özdemir, & Özdemir, 2006; Kocabey, 2019).

Zemin mekaniğinde genellikle Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre sınıflandırılan zeminlerde, zemin sınıfına göre farklı stabilizasyon teknikleri uygulanabilir. Zemin türlerine göre stabilizasyon tekniklerinin uygulanabilirliği Şekil 1 vasıtasıyla açıklanmıştır.



Şekil 1. Zeminlerde stabilizasyon tekniklerinin uygulanabilirliği (Yıldırım, 2002).

Zemin stabilizasyon çalışmalarını kısaca üç grupta toplayarak açıklamak mümkündür (Van Impe, 1989).

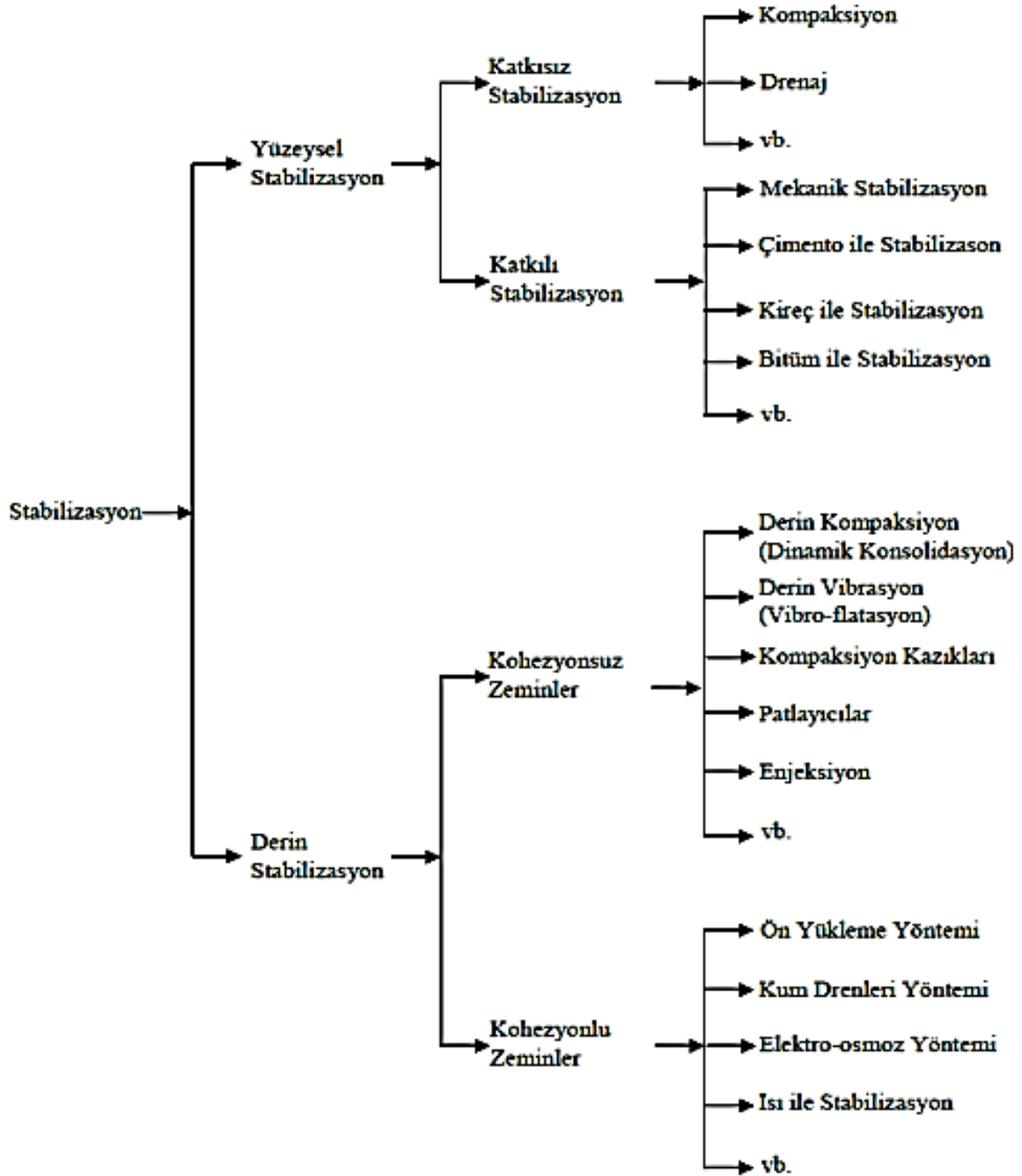
- Zayıf olan zeminde katkı maddeleri kullanımıyla kalıcı bir iyileştirme yapılması. Zayıf zeminin bitüm, kireç, çimento, uçucu kül vb. katkılarla homojen bir şekilde harmanlanması suretiyle zemin özelliklerinin iyileştirilmesi, geotekstil vasıtasıyla ve kireç kazıkları kullanılarak iyileştirilmenin yapılması şeklinde örneklenebilir.
- Katkısal nitelikte bir malzeme kullanılmaksızın zeminde kalıcı iyileştirmeler gerçekleştirme. Yüzey kompaksiyonu metodu, vibro kompaksiyon metodu, dinamik konsolidasyon metodu vb. uygulamalar misal olarak verilebilir.
- Yeraltında bulunan su seviyesinde düşüş sağlayarak, elektro-osmoz ya da ısıl işlemler vb. uygulamalar ile zeminde geçici bir iyileştirme sağlanabilir.

İKİNCİ BÖLÜM

Kuramsal Çerçeve

Zemin İyileştirme Metotları

Zayıf mühendislik özelliklerine göre zeminlerin iyileştirilmesi metotları Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. Zeminler için stabilizasyon teknikleri (Uzuner, 2013).

Zeminlerin iyileştirilmesi çalışmalarındaki asıl amaç zemin içerisinde bulunan boşlukların ve zeminin içeriğindeki suyun miktarında azalmanın sağlanması, zeminde bulunan boşluklu kısımların özel karışım malzemelerle doldurulmasının sağlanması bunun yanı sıra zemin'in sağlamlaştırılmasıdır (Sağlamer, 1985).

Yapılan bu tez çalışmasında mühendislik olarak dayanım özellikleri zayıf, kil oranı yüksek bir zemine uçucu kül katkısı karıştırılmıştır. Uçucu kül ayrıca öğütülerek daha ince dane boyutunda karıştırılıp kullanılmıştır. Zeminin dayanımda hangi oranlarda değişiklik meydana geldiği araştırılmıştır.

Genel olarak zemin stabilizasyonu konusuna bakılınca mekanik teknikler ve kimyasal tekniklerle zemin iyileştirilmesi iki şekilde grupta yapılabilir. Mekanik olarak zemin stabilizasyonu zeminlerde fiziksel işlemler kullanılarak hem mekanik hem fiziksel hem de hidrolik özelliklerde değişiklikler meydana getirmektedir. Özetle iyileştirilmesi arzu edilen zeminin kazılıp, mekanik özellikler bakımından iyileştirmeler sağlanıp, ait olduğu yere yeniden yerleştirme safhalarını kapsamaktadır (Edil, Benson, Bin-Shafique, Kim, Tanyu, & Senol, 2002).

Mekanik stabilizasyon.

Mekanik olarak iyileştirme tekniğinde ana gaye farklı zeminlerin önceden belirlenmiş oranlarda karıştırılıp arzu edilen özelliklerde zemin oluşturmaktır (Aytekin, 2004).

Mekanik stabilizasyon gradasyonda derecelenme, plastisite indisinde ve likit limitte azalış, kapilaritede düşüş, durabilite ve dayanımda artış sağlar (Winterkorn, & Fang, 1975).

Zemin stabilizasyonunda derin uygulamaların gerek arz etmediği durumlarda zemin iyileştirilmesi yüzeysel olarak gerçekleştirilir. Zemin iyileştirmesinde yüzeysel uygulamalar genel olarak üst yapı yük değerlerinin fazlaca hesaplanmadığı yapı ve yol inşasında tercih edilir. Özetlemek gerekirse, fazlaca derinlere inilmesine ihtiyaç duyulmaksızın zemine yüzeysel müdahale ederek iyileştirilmesi yüzeysel stabilizasyon olarak adlandırılır (Öksüz, 2006).

Zemin iyileştirilirken hiçbir katkı kullanmadan gerçekleştirilen uygulamaya katkısız stabilizasyon tanımı yapılır. Mevcut bulunan zeminde uygun granülometri varsa bu tip iyileştirme yapılabilir (Özaydın, 1989).

Katkısız stabilizasyonu genel olarak kompaksiyon ve drenaj yöntemleri olarak ikiye ayırmak mümkündür.

Zeminlerde mekanik bir enerjiyle sıkıştırılma sağlanmasına kompaksiyon denir. Diğer bir deyişle zeminlerde daneler arası boşluklu durumların azaltılarak danelerin sıkılaşması amacıyla gerçekleştirilen uygulamalardır (Özaydın, 1989). Kompaksiyon işleminde zemindeki daneler hava dışarı atılarak yakınlaştırılır (Çakır, 2001).

Zemin suyu, zeminlerde mühendislik durumları açısından problemlere yol açabilir. Su zeminlerde doyunluk durumuna, sıvılaşmaya, kaldırma kuvveti durumlarına, sızma basınç oluşumu vb. durumlara yol açabilir (Cedergren, 1989).

Bir bölgede bulunan suyu hem doğal hem de suni yöntemlerle uzaklaştırmak için kullanılan çalışmalar drenaj olarak adlandırılır. Su miktarındaki fazlalaşma bilhassa kohezyonlu zeminde mukavemet ve taşıma gücünde düşümlere yol açar. Alt yapıdaki iyi bir drenaj sistemi, zeminde mümkün olduğunca üniform şekilde su muhtevası oluşmasına neden olur (Uzuner, 2006).

Kimyasal stabilizasyon.

Kimyasal tekniklerle stabilizasyonun sağlanması zeminin içerisine bazı katkı malzemeleri katılarak zeminin katılan malzemeler ile reaksiyon oluşturması neticesinde zemin özelliklerinde iyileştirmeye gidilmesidir (Lambe, Khosla, & Jayaratne, 1990).

Zeminlerin iyileştirilmesi tekniğinde bazı katkıların kullanımı önceleri ulaşım yapılarının temel kısımlarında kullanılırken su için oluşturulan yapılarda da bu metottan istifade edilmiştir. Bu teknikten aynı zamanda hafif yapılara ait temel kısımlarında da faydalanılmıştır (Önalp, 1983). Kimyasal olarak zemin stabilizasyon tekniği ekonomik açıdan elverişlidir (Kukko, 2000).

Sıkıntılı zeminlerin farklı katkıları eklenerek mühendislik özelliklerinde iyileşmeye gidilmesi katkı stabilizasyon olarak açıklanır. Kireç, çimento, bitüm ve uçucu külde sıkça kullanılan katılardandır (Kocabey, 2019).

Ayrıca kullanılıp yıpranmış atık durumdaki araç lastikleri, toz haline getirilmiş mermer ve kloridler katkı malzemesi olarak zeminlerin stabilizasyonunda istifade edilebilecek malzemelerdendir (Kocabey, 2019).

Zemin iyileştirmesinde bir takım katkıların kullanımı ile zayıf özellik gösteren bir zeminde güvenli, ekonomik açıdan uygun, aynı zamanda doğal malzemeler ile sağlamaştırma amaçlanır (Hausmann, 1990).

Çimento stabilizasyonu yöntemine hava meydanlarında, karayollarının altyapısında çok sık başvurulmaktadır. Zemine kuru ağırlık miktarının %5-%15 arası oranlarda çimento karıştırılıp kompaksiyon uygulanarak yapılabilir (Tumluer, 2006).

Bitüm, asfalt gibi petrol içerisinden imal edilen, yapışkanlık özelliği gösteren, siyah renkli sıcak iken sıvı vaziyette bulunan üründür (Uzuner, 2000).

Malten ile asfalten diye ikiye ayrılır n-hepten içinde çözülebilen bölümüne malten denirken, kısma da asfalten olarak isimlendirilir (İlcalı, Tayfur, Özen, Sönmez, & Eren, 2001). Asfalt kullanılarak gerçekleştirilen stabilizasyonda zemin, yapısını sudan kaynaklı olumsuz etkilerden korumuş olur. Ayrıca danelerde meydana gelen yapışma durumu da su kaynaklı erozyona ve de rüzgâra karşı direnç artışı sağlar (Özaydın, 1989).

Bitüm kullanılarak gerçekleştirilen iyileşme uygulaması kil oranı yüksek zeminden daha çok plastik özellik göstermeyen granüler zeminde yapılır. Bu tip zeminde bitüm daneler arasında bağlanma ve su geçirmezlik oluşturur. Ayrıca taşıma gücü bakımından pozitif etkilenir (Hausmann, 1990; Çakılcıoğlu, 2007).

Kireç taşı diğer adıyla kalker, kalsine edildiğinde meydana çıkan kalsiyum esaslı madde kireç olarak isimlendirilir. Yapısına kimyasal açıdan bakarsak magnezyum karbonat veya kalsiyum karbonat bulunur. Haricen farklı oranlarda olmak üzere kükürt, alüminyum, demir ve silisyum vb. elementlerine bulunduğu görülür. (Kızılcıçelik, 2010)

Kireç kullanılarak yapılan iyileştirme tarihteki en eski uygulamalardandır. Bu uygulamaları Hititler, Çinliler, Babilliler, Persler ve Mısırlıların kullandığı bilinmektedir (Ghabae, 2015).

Modern zamanlı olarak bakılırsa ilk olarak 1924 senesinde inşaat uygulamasında kullanılan kireç, 1930 senesi sonrasında kil oranı yüksek zeminlerde iyileştirme amacıyla kullanılmıştır. Bilhassa II. Dünya Savaşı sürerken inşa edilen demir ve karayolu çalışmalarında kullanıldığı bilinmektedir. Günümüzdeki temellerin ıslah edilmesinde, otoyollarda, demiryollarında, yapı inşaatlarında, havaalanlarında kullanımı sürmektedir (Erkan, 2007).

Eren ve Filiz'in yapmış oldukları çalışmada (2009) kirecin %8 oranlı kullanılmasıyla, zeminde şişme durumunun tamamlandığını tespit edilmiştir (Eren, & Filiz, 2009). Stabilizasyonun kireç kullanılarak yapılabilmesi için su ortamda bulunmak zorundadır (Little, 1987). Zemin stabilizasyonunun kireç ile yapılması akabinde katyon değişimi, çimentolaşma, agregasyon ve yumaklaşma olayları olur (Fang, 1991).

Yapay puzolanlar, endüstriyel faaliyetler akabindeki tali ürünler şeklinde ortaya çıkan ve puzolanik özellik gösteren materyallere verilen isimdir. Uçucu kül, pirinç kabuğu külü, silis dumanı, yüksek fırın cürufu fazlaca bulunan yapay puzolan türleridir. Termik üretim yapan santrallerde kömürün toz hale getirilerek yakılması akabinde tali ürün şeklinde meydana gelen malzemeye uçucu kül adı verilir (Demir, 2019).

Şişen kil özellikli bir zeminde C sınıfı uçucu kül kullanılarak, stabilizasyon çalışması gerçekleştirilmiş ve optimum kullanım uçucu kül oranının %35 olduğu belirlenmiştir (Mollamahmutoğlu, Yılmaz, & Güngör, 2009).

Zeminlerin stabilizasyonunda uçucu kül malzemesinin kullanımı genellikle plastik limit ve maksimum kuru yoğunluk değerlerinde artış, optimum su içeriği ve likit limit değerlerinde düşüş, zemin geçirimsizlik değerinde azalış ortaya çıkarır (Kumar, & Sharma, 2004). TS 639 ile ASTM C618 standartları uyarınca uçucu küller bileşimleri itibari ile C ve F sınıfı olarak 2 gruba ayrılırlar.

Bununla birlikte; elastisite modülü ile CBR değer artışını (Edil, Acosta, & Benson, 2006); doğrusal olarak büzülme değerlerinde azalış (Buhler, & Cerato, 2007) ; durabilite durumunda artış (Yarbaşı, Kalkan, & Akbulut, 2007) ; görünebilen kohezyon değerlerinde artma ile içsel sürtünme açısı değer azalması (Lin, Lin, & Luo, 2007) ; serbest şişme yüzde değer azalışı (Seco, Ramirez, Miqueleiz, & Garcia, 2011) ; serbest basınç deney sonucu olarak dayanım artışı (Kumar, Walia, & Bajaj, 2007) sonuçlarına ulaşılmıştır.

Brooks (2009) çalışmasında; uçucu küle pirinç kabuğu külü ile stabilizasyon yapmıştır. Maksimum dayanım değerleri, uçucu külün %25 ve pirinç kabuğu külünün %12 kullanılmasıyla elde edilmiştir.

Yılmaz (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada düşük plastisite değerlerine sahip killi zeminde uçucu kül %0'dan başlanarak %30'a kadar 5'er artan oranda kullanılmış ve serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, maksimum dayanım elde edebilmek için uçucu kül katkısının %25 oranında kullanılması gerektiği tespit edilmiştir.

Ferguson (1993), yapmış olduğu çalışmada C sınıfı bir uçucu külü yarış pisti olarak kullanılacak olan yerdeki ham zemin ile karıştırmış, sonuçta CBR değerinde artış, zeminde şişme potansiyelinde azalış tespit etmiştir.

Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu taşıma gücü ve şişme açısından problemli zeminlerde uygundur. Bu stabilizasyon türü zeminlerde dayanım artışı, kazı ve dolgu maliyet düşüşü sağlar (Çetin, 2011).

Bu alışma kapsamında iki farklı inceliğe sahip uçucu kül, kil bir zeminin stabilizasyonunda kullanılmıştır. %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında iki farklı incelikte kullanılan uçucu kül ile birlikte, zeminin indeks, dayanım ve CBR değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Çalışma kapsamında uçucu kül dane boyutunun dayanım ve CBR değerlerine etkisi detaylı olarak incelenmiştir.



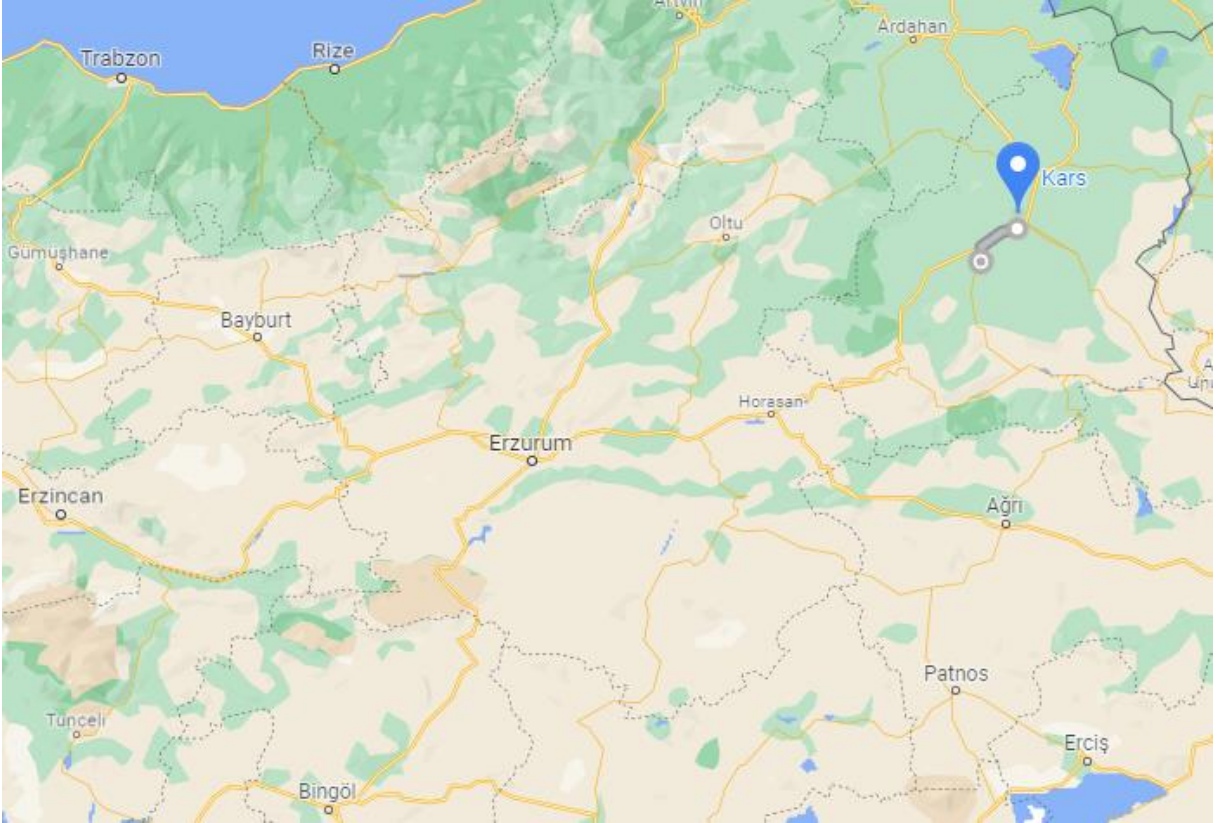
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

Materyal ve Yöntem

Bu tez çalışmasındaki temel amaç, uçucu kül maddesinin termik santralden alındığı haliyle ve öğütülmüş haliyle zemin stabilizasyonunda kullanımını araştırmaktır. Hazırlanan deney numunelerine ait notasyonlar ve hazırlanan karışımlara ait zemin özellikleriyle yapılan deneyler bu bölümde açıklanmıştır.

Materyal

Bu tez çalışmasında kullanılmış olan doğal zemin malzemesi Kars ilinin merkezinden ve yer yüzeyinden 2 metre derin kısmında alınmıştır. Malzeme alınarak Kars Karayolları 18. Bölge Müdürlüğü AR-GE Laboratuvarına getirilmiştir. Doğal malzemenin temin edildiği bölgenin konumu Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Doğal malzemenin alındığı yerin konumu.

Deneyler başlamadan önce zemin malzemesi 24 saatlik süre boyunca etüv içinde kurutulmuştur. Daha sonrasında deneyler için numuneler hazırlanmaya başlanılmıştır. Deneylerde kullanılan numunelere ait notasyon bilgileri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Hazırlanan Numunelere Ait Notasyonlar

Deneyleerde kullanılan numunelerin karışım oranları	Notasyonlar
Doğal Zemin	Z
Zemin, % 5 Uçucu Kül (İnce)	ZUKİ5
Zemin, % 10 Uçucu Kül (İnce)	ZUKİ10
Zemin, % 15 Uçucu Kül (İnce)	ZUKİ15
Zemin, % 20 Uçucu Kül (İnce)	ZUKİ20
Zemin, % 25 Uçucu Kül (İnce)	ZUKİ25
Zemin, % 30 Uçucu Kül (İnce)	ZUKİ30
Zemin, % 5 Uçucu Kül (Kalın)	ZUK5
Zemin, % 10 Uçucu Kül (Kalın)	ZUK10
Zemin, % 15 Uçucu Kül (Kalın)	ZUK15
Zemin, % 20 Uçucu Kül (Kalın)	ZUK20
Zemin, % 25 Uçucu Kül (Kalın)	ZUK25
Zemin, % 30 Uçucu Kül (Kalın)	ZUK30

Yapılan deneyleerde kullanılan uçucu kül malzemesi Afşin-Elbistan termik santrali'nden temin edilmiştir. Uçucu külün kil zemin stabilizasyonunda kullanımında inceliğın etkisinin araştırılması maksadıyla yapılan bu çalışmada doğal malzemeye %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında hem ince hem de kalın olmak üzere eklenmiştir.

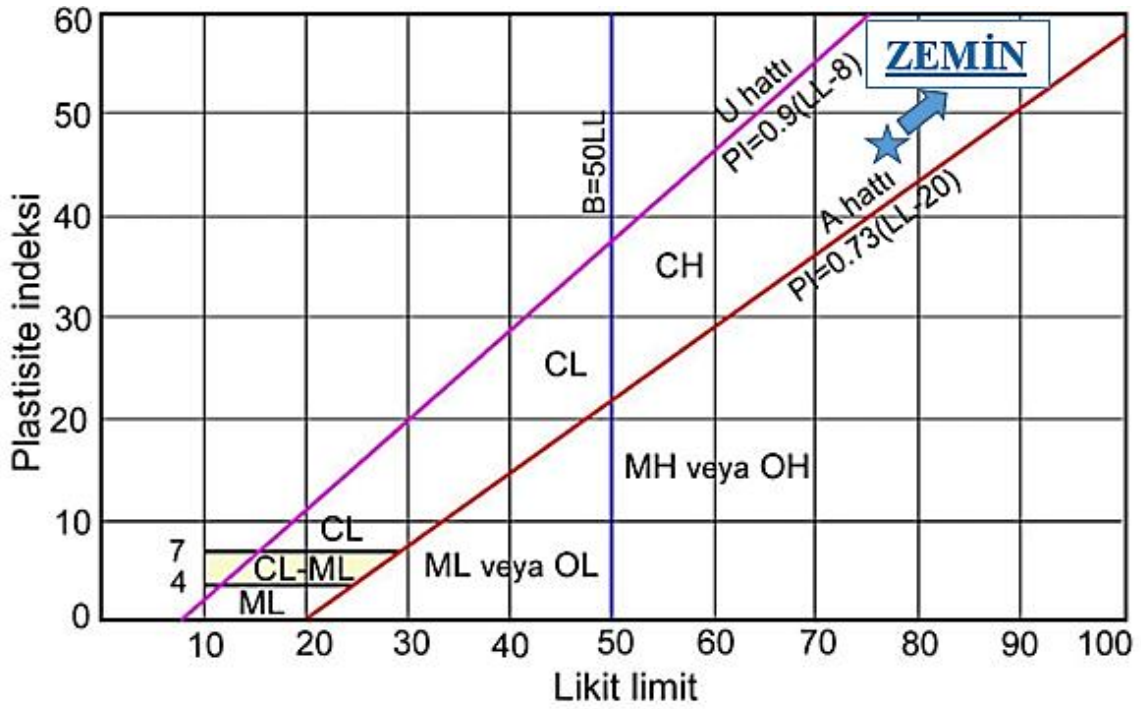
Doğal malzemenin mühendislik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Zeminin Mühendislik Özellikleri

USCS sınıflandırma	CH
Maksimum kuru yoğunluk, ρ_{kmax} (Mg/m ³)	1,20
Optimum su içeriği, w_{opt} (%)	37
Likit limit, LL (%)	77,2
Plastik limit, PL (%)	30,2
Plastisite indisi, PI (%)	47

Doğal malzeme laboratuvara getirilerek 4 No'lu elekten elenerek etüvde kurutulmuştur. Kuru hale gelen malzemedan toplamda 9256 gr. alınarak yarılama işlemi yapılmıştır. Yarılama işlemi akabinde 543 gr. kalan malzeme alınarak No:200 (0,075 mm) elekte temiz su ile yıkanmıştır. Elekte gidebilecek büyüklükte olan malzeme tamamen yıkandıktan sonra malzemenin kalan kısmı porselen kaba alınıp etüvde kurutulmuştur. Kuruyan malzeme tartılarak 6,52 gr. olarak föye işlenmiştir. Kalan 6,52 gr. malzeme 543 gr. yıkamadan önceki malzemeye oranlandığında %1,2 'lik kısmının kaldığı, %98,8 'lik kısmı No: 200 elekte yıkama esnasında gittiği anlaşılmıştır. Zemin, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Metodu'na göre yüksek plastisiteli kildir. Çalışma kapsamında kullanılan malzemenin sınıfı kıvam limitleri

deneyleri sonuçlarına göre LL ve PI değerleri göz önüne alınarak TS 1500 standartında yer alan plastisite kartında (CH) şeklinde belirlenmiştir ve şekil 4'te işaretlenmiştir.



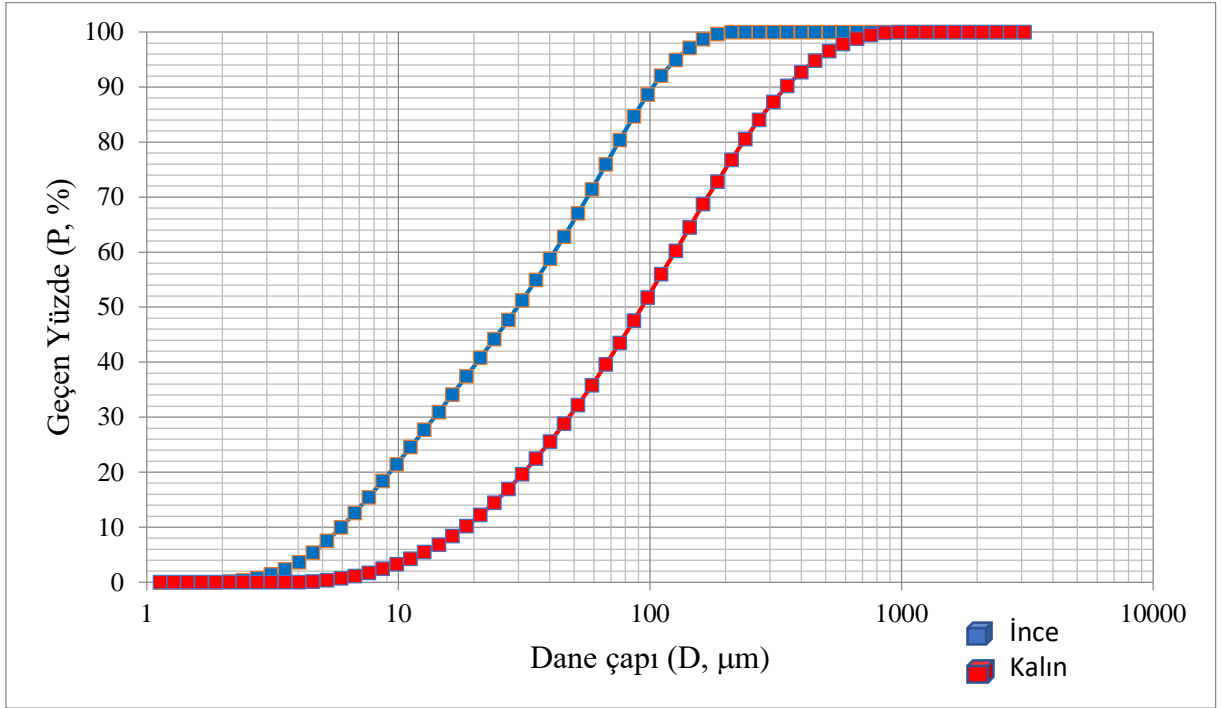
Şekil 4. Plastisite kartı (TS1500).

Deney numuneleri hazırlanırken kullanılan uçucu küle ait özellikler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Uçucu Külün Kimyasal, Fiziksel Özellikleri

Kimyasal Özellikler	
SiO ₂ (%)	23,08
Al ₂ O ₃ (%)	6,25
Fe ₂ O ₃ (%)	2,58
CaO (%)	47,03
MgO (%)	1,60
SO ₃ (%)	14,61
K ₂ O (%)	0,47
Na ₂ O (%)	0,32
Kızdırma Kaybı (%)	3,95
Cl (%)	0,0334
Fiziksel Özellikler	
45 µ elek üzeri (%)	4,0
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,44
Blaine (cm ² /g)	2496
Puzolanik aktivite	15,8

İnce ve iri daneli uçucu küle ait granülometri eğrisi Şekil 5’de sunulmuştur.



Şekil 5. İnce ve iri daneli uçucu küle ait granülometri eğrisi.

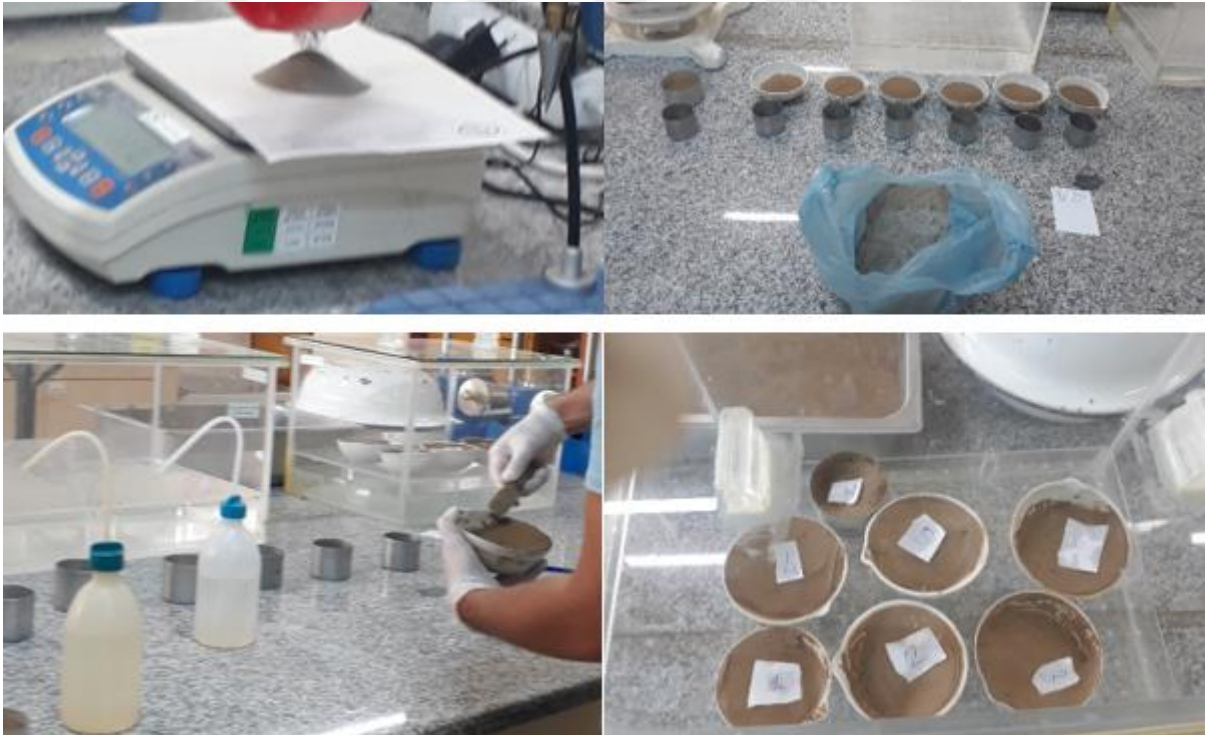
Şekil 5’ten görülebileceği üzere ince daneli uçucu küle ait D₉₀ değeri 103 µm iken iri daneli uçucu küle ait D₉₀ değeri 349 µm’dir. Bir başka ifade ile ince daneli uçucu küle ait %90’u 103 µm altı malzeme iken, iri daneli uçucu küle ait %90’u 349 µm altı malzemedir. İnce daneli uçucu küle ait D₅₀ değeri 29,7 µm iken iri daneli uçucu küle ait D₅₀ değeri 93 µm’dir. Yani ince daneli uçucu küle ait %50’si 29,7 µm altı malzeme iken, iri daneli uçucu küle ait %50’si 93 µm altı malzemedir. İnce daneli uçucu küle ait D₁₀ değeri 5,93 µm iken iri daneli uçucu küle ait D₁₀ değeri 18,4 µm’dir. Yani ince daneli uçucu küle ait %10’u 5,93 µm altı malzeme iken iri daneli uçucu küle ait %10’u 18,4 µm altı malzemedir.

Yöntem

Kıvam limitleri.

Kıvam limitleri zeminlerde taneler ile su arasında bulunan teması ve suyun değişen oranlarına göre zeminin sertlik-yumuşaklık durumu hakkında bilgi verir. İsveçte yetişen kimyager Albert Atterberg ince dane yapısında bulunan zeminlerde mühendislik özellikleri bulunurken yardımcı olması amacıyla kıvam limitleri adıyla su muhtevası değerlerini bulmuştur (Atterberg, 1911).

Likit limit değeri tayini için doğal zemin DSİ Kars 24. Bölge Müdürlüğü Kalite Kontrol ve Laboratuvar Şube Müdürlüğüne getirilmiştir. Burada doğal kurutmaya bırakılan zemin 0.425 mm (No:40) elekten geçirilmiŐtir. Deney için belirli miktarlarda alınan zemin, karıŐtırma kabı içinde üzerine saf su eklenip homojen Şekil alıp macun kıvamı yakalanana kadar spatula yardımıyla iyice karıŐtırılır. Macun kıvamına gelen numune hava geçirmez desikatöre konularak 24 saat süre ile bekletilir. Desikatrden ıkarılan numune 10 dakika daha karıŐtırılır. HazırlanmıŐ olan numune likit limit için Casagrande aletinde yarım küre kapağına iç kısmına ykseklėęi en fazla 1 cm olacak Şekilde sıvanır. Sıvanan numunelerin yüzeyleri taban yüzeye paralel gelecek Şekilde düzlenir. Kapağa sıvanan numune oluk açma bıçağıyla 2 eşit parçaya ayrılır. Otomatik Casagrande cihazı saniyede 2 vuruŐ yapacak Şekilde ayarlanır. Numunenin üzerinde açılan yarık vuruŐ etkisiyle yaklaşık 13 mm açıklığa kadar kapanması beklenir. 25 vuruŐta gereken açıklığa gelmesi ideal kabul edilir. Ardından su içeriğinin saptanabilmesi için bir miktar numune alınarak tartılır ve etüvde kurutulup tekrar tartılarak su içeriği hesaplanır. Notasyonları verilen her karışım için bu işlemler ayrı ayrı yapılır. Ham zemine malzeme eklenirken zeminin miktarı aynı alınır. Katkı malzemeleri istenen oranda ilave edilir. Likit limit deneyi için numune hazırlama aşamaları Şekil 6’da, Casagrande deney aleti ve oluk açma bıçağı tarafından ikiye bölünen numune Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 6. Likit limit deneyi yapım aşamaları.



Şekil 7. Casagrande deney aleti ve oluk açma bıçağı tarafından ikiye bölünen numune.

Likit limitin bulunması için hazırlanan numunelerin bir miktarı plastik limit deneyi için alınır. Alınan numunede kıvam, parmaklarımıza yapışmayacak şekilde ve kolayca yuvarlanabilecek şekilde homojen olmalıdır. Numune 3 mm. çapında silindir bir şekil alana kadar avuç içimizle düz bir yüzeyde (cam) yuvarlarız. 3 mm'lik çapa sahip metal çubuk vasıtası ile kontrol edilir. Numunede kılcal çatlaklar oluşuncaya kadar uygulamaya devam ettirilir. Ardından çatlayan ve dağılmaya başlayan numune rutubet kabına alınarak su içeriği hesaplanır. Bu uygulama 3 kez tekrarlanır. Notasyonları verilen her karışım için bu işlemler ayrı ayrı yapılır. Ham zemine malzeme eklenirken zeminin miktarı aynı alınır. Katkı malzemeleri istenen oranda ilave edilir. Numunelerin hazırlanma aşamaları Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 8. Plastik limit deney numunelerinin hazırlanması.

Kompaksiyon deneyi.

Zeminin tabaka tabaka serilip, boşluk oranının azaltılması, zemin danelerinin birbirlerine yaklaştırılması ve sıkıştırılmış duruma getirilmesi işlemi kompaksiyon olarak tanımlanır. Kompaksiyon işlemi neticesinde zeminde dayanım ile taşıma gücü değerlerinde artış, oturmalarda azalış aynı zamanda hacim değiştirme direncinde artış sağlanır (Fidan, 2016). Kompaksiyon deneyleri standart ve modifiye proktor şeklinde iki farklı yapılabilir. Bu çalışmada standart Proctor deney yapılarak, ρ_{kmax} ve bu değer karşılığı olan w_{opt} değerleri bulunmuş. Kompaksiyon yapılan otomatik proktor deney aleti Şekil 9’da sunulmuştur.



Şekil 9. Proctor Deney Cihazı (Otomatik) ve kontrol-gösterge paneli.

Zemin 24 saat etüvde kurutulduktan sonra 4 No’lu elekte elenerek, elekten geçen kısmı alınır. Malzemedden bir miktar alınıp PI değerine göre su eklenerek harmanlanır. Rutubet kaybetmemesi için üzerine nemli bir havlu, bez örtülmesi uygun olur. Kompaksiyon kalıbı alt taban plakası ile birlikte tartılır. Föye işlenir. Kalıba 1. tabaka olarak bir miktar malzeme dökülür. Kalıp cihaza yerleştirilerek 2,49 kg ağırlıklı tokmakla 25 darbe her tarafı eşit olacak şekilde sıkıştırılır. Ardından 2. tabaka için bir miktar daha malzeme eklenir. Aynı işlem tekrarlanır. Ardından 3. tabaka kısmına aynı işlem uygulanır. Sonrasında malzeme kalıplı olarak düz bir zemine konulur. Demir cetvelle kalıbın üstündeki fazlalık malzeme tesfiye edilir. Ve kalıp+numune tartılıp föye işlenir. Kalıbın içindeki malzemedden numune alınır. Daha sonra su yüzdeleri arttırılarak aynı işlemler yapılır. Deneyler sonucunda $\rho_k - w$ grafiği çizilerek ρ_{kmax} ve w_{opt} değerleri tayin edilir. Proktor deneyi yapım aşamaları Şekil 10’da gösterilmiştir.



Şekil 10. Proctor deneyi yapım aşamaları.

Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi.

CBR deneyi için kurutulmuş malzemeden bir miktar alınır, su ile karıştırılarak harmanlanır. Üzerinin rutubetli havluya örtülmesi uygun olur. CBR kalıbı alt taban ve yaka hariç tartılarak föye işlenir. Yaka, kalıp ve alt taban birleştirilir. Kalıbın içine ağırlık diski koyulur. Üzerine süzgeç kağıdı konulur. Proktor cihazı kullanılarak aynı şekilde sıkışması sağlanır. Demir cetvel ile tesfiye yapıldıktan sonra kalıp+numune tartılıp, föye işlenir. Kalıp + taban plakası + yakası takılır. 3 tam 1 yarım yük diski konulur. (1 yük diskinin ağırlığı: 2,27 kg'dır). Kalıbın üstüne komparatör saati sıfırlanarak yerleştirilir. Kalıp su dolu havuzun içinde bekletilir. Komparatör saati takip edilerek sabit bir değere gelene kadar suda bekletme işlemine devam edilir. Şişme değerleri kaydedilir. Sonra kalıp sudan çıkartılarak yaklaşık 10 dk süzülmesi beklenir. Komparatör saati ayağı çıkarılır. CBR cihazı altına yerleştirilerek değerler bulunur. Değerlerin içerisinde 2.5 mm ve 5 mm'ye karşılık okunan değerler hesaplanır ve büyük olan değer CBR değeri olarak alınır ve föylere işlenir. Eğer 5 mm olan değer büyük ise deney tekrarlanır yine büyük çıkarsa föye işlenerek kaydedilir. CBR deneyinin yapıldığı cihazı ve CBR deney kalıbı ve yük diski Şekil 11'de, Hazırlanan ve havuzda bekletilen numune ile havuzdaki numunenin komparatör saati ile takip edilmesi Şekil 12'de, CBR cihazından alınan değerlerin okunması Şekil 13'te sunulmuştur.



Şekil 11. CBR deney cihazı ile CBR deney kalıbı ve yük diski.



Şekil 12. Hazırlanan ve havuzda bekletilen numune ile havuzdaki numunenin komparatör saati ile takip edilmesi.



Şekil 13: CBR cihazından alınan değerlerin okunması.

Serbest basınç deneyi.

Bu çalışma kapsamında yapılan serbest basınç deneyleri ile birlikte uçucu külün inceltirilerek kil zemin stabilizasyonunda kullanılmasının dayanıma etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla hazırlanan numuneler 50 mm çapında 100 mm yüksekliğinde silindirik numunelerdir. Serbest basınç deneyleri için toplamda 78 adet numune üretilmiştir. Hazırlanan numunelerin 7 ve 28 gün sonunda kırılımları yapılmıştır. Serbest basınç deney düzeneği Şekil 14'te, deney numunelerinin hazırlanış aşamaları Şekil 15'de gösterilmiştir.



Şekil 14. Serbest basınç deneyi düzeneği.



Şekil 15. Serbest basınç deney numunelerinin hazırlanma aşamaları.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

Araştırma Bulguları

Yapılan tez çalışmasında Kars ilinden temin edilen yüksek plastisiteli kil ham zeminin uçucu kül ile stabilizasyonu araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, uçucu kül iki farklı incelikte kullanılmış ve inceliğin dayanım ile CBR değerleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda Afşin-Elbistan santralinden temini sağlanmış olan uçucu kül maddesi hem öğütülmüş hem de öğütülmemiş haliyle zemin ile karıştırılmış ve deneyler için numuneler oluşturulmuştur. Elek analizi, Standart Proctor ve CBR deneyleri KGM Kars 18. Bölge Müdürlüğü AR-GE Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Kıvam limitlerinin bulunabilmesi için plastik limit ve likit limit deneyleri DSİ Kars 24. Bölge Müdürlüğü Kalite Kontrol ve Laboratuvar Şube Müdürlüğü'ne ait laboratuvarında yapılmıştır. Serbest basınç deneyleri ise Bayburt Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Doğal zemine sıra ile %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında öğütülmüş (ince) ve öğütülmemiş vaziyette uçucu kül katılarak deneyler tamamlanmıştır. Elde edilen bulguların incelenmesi bu bölümde açıklanmıştır.

Kıvam limit deneyleri sonuçları.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen kıvam limit deneyleri sonuçları Tablo 4'te verilmiştir.

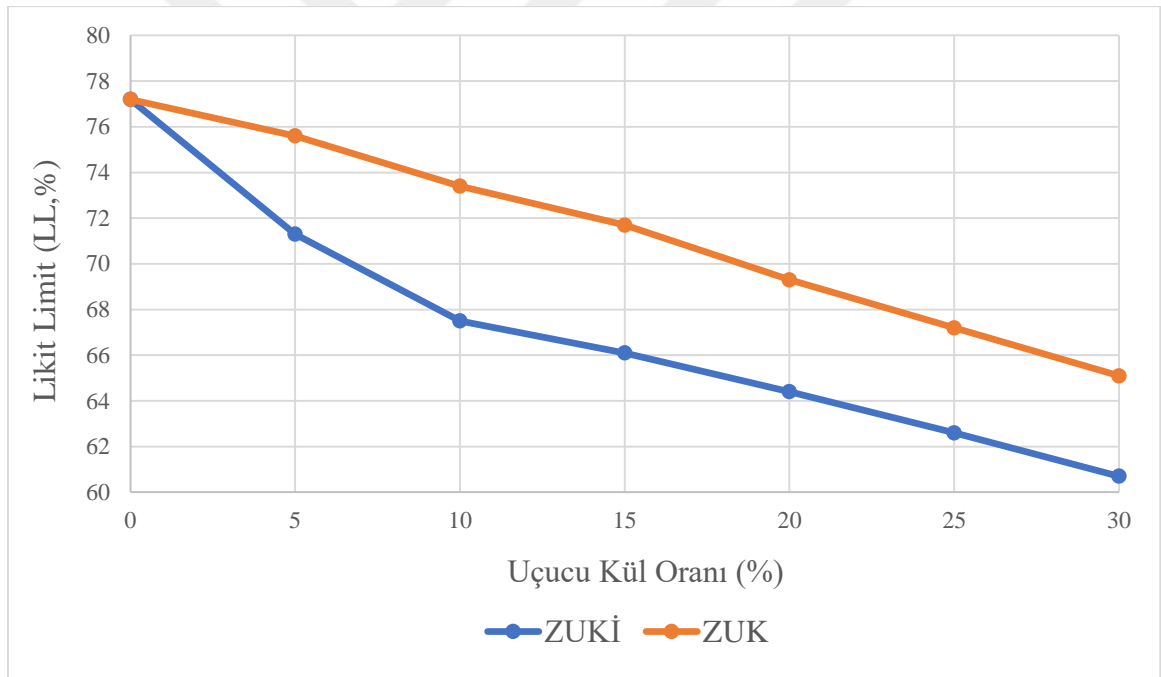
Tablo 4. Numunelerin Kıvam Limit Deney Sonuçları

Karışımlar	LL(%)	PL(%)	PI(%)
Z	77,2	30,2	47
ZUKİ5	71,3	38,3	33
ZUKİ10	67,5	40,5	27
ZUKİ15	66,1	41,6	24,5
ZUKİ20	64,4	43,2	21,2
ZUKİ25	62,6	44,8	17,8
ZUKİ30	60,7	46,2	14,5
ZUK5	75,6	32,1	43,5
ZUK10	73,4	34,3	39,1
ZUK15	71,7	36,6	35,1
ZUK20	69,3	38,3	31
ZUK25	67,2	40,4	26,8
ZUK30	65,1	42,7	22,4

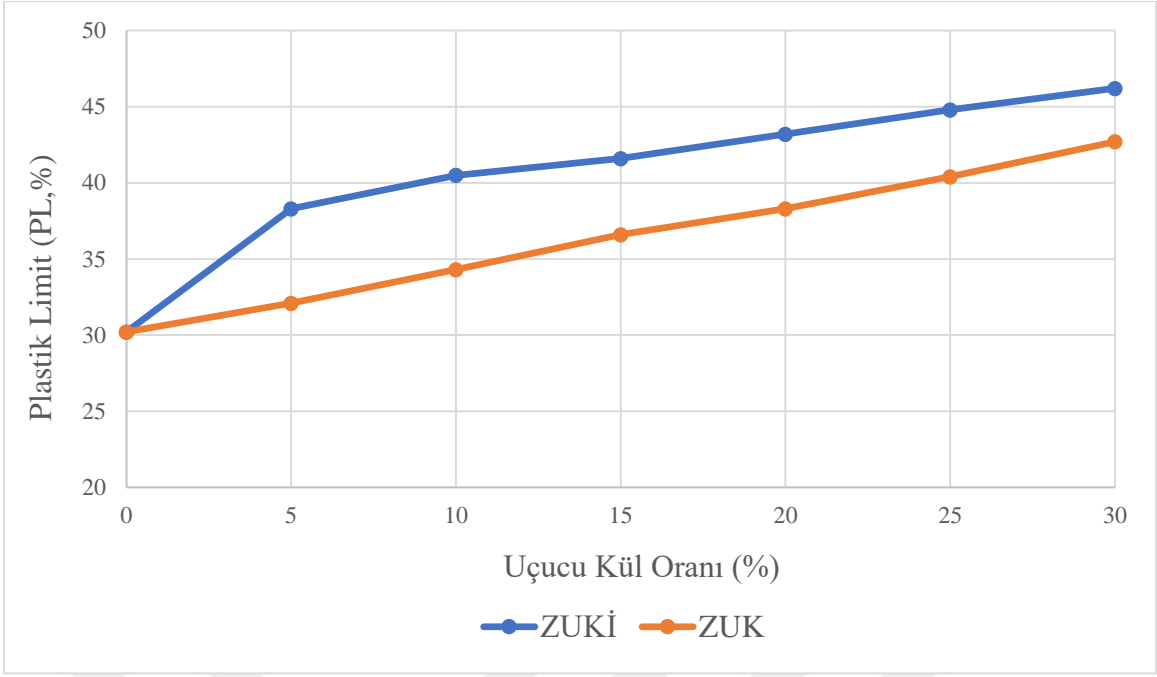
Tablo 4'te açıklanan kıvam limitleri sonuçlarına göre, en yüksek likit limit ve plastisite indisi değerleri doğal zemine aittir. Doğal zemine uçucu kül eklenmesiyle birlikte likit limit

değerlerinde azalmalar belirlenmiştir. İnce daneli uçucu kül, iri daneli uçucu küle göre likit limit değerlerini daha fazla düşürmüştür. Likit limit değeri en düşük olan numune ZUKİ30 numunesidir. Plastik limit değerleri incelendiğinde, en düşük plastik limit değerine sahip numunenin doğal zemin olduğu, uçucu kül ilavesi ile birlikte plastik limit değerlerinin arttığı, ilave edilen uçucu külün ince daneli olmasıyla birlikte bu artışın daha yüksek mertebelerde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Plastisite indisi değerlerinde uçucu kül ilavesiyle birlikte belirgin azalışlar meydana gelmiştir. İnce daneli uçucu külün, iri daneli uçucu küle göre likit limit değerlerini daha fazla azalttığı, plastik limit değerlerini ise daha fazla artırdığı yapılan kıvam deneyleri sonucunda belirlenmiştir.

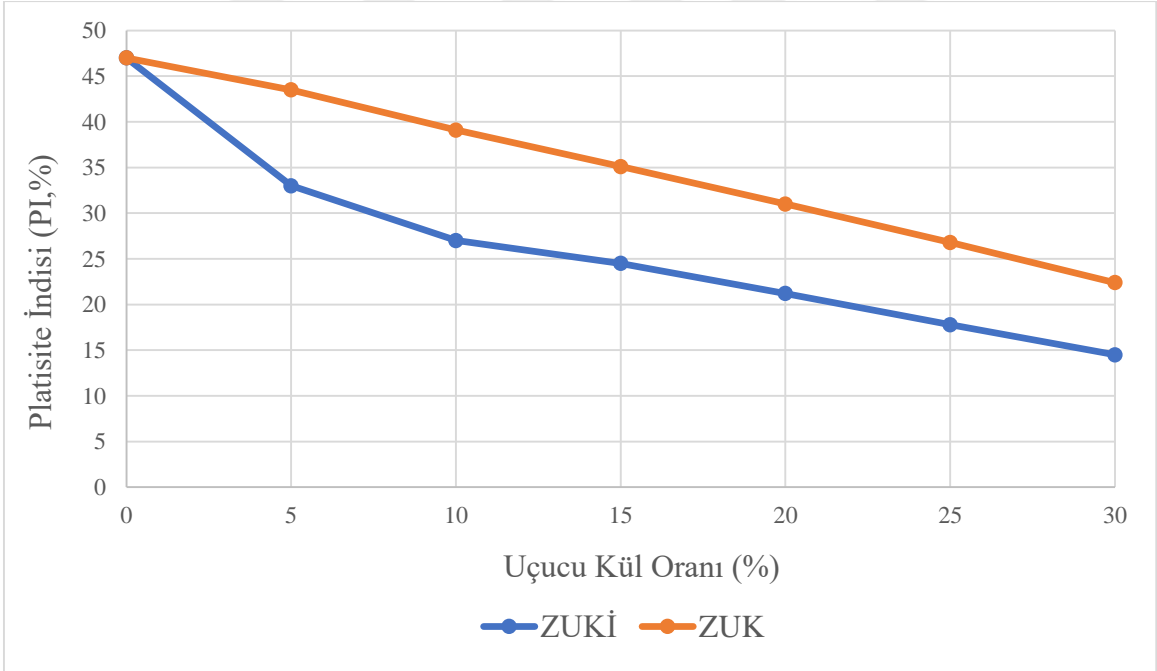
Yapılmış olan kıvam limitleri deney sonuçlarına göre oluşturulmuş olan ZUK ve ZUKİ numunelerine ait LL değerleri grafiği Şekil 16'da, PL değerleri grafiği Şekil 17'de, PI değerleri grafiği Şekil 18'de verilmiştir.



Şekil 16. Numunelerin likit limitleri.



Şekil 17. Numunelerin plastik limitleri.



Şekil 18. Numunelerin plastisite indisleri.

Kompaksiyon deneyleri sonuçları.

Deneyleer kapsamında oluşturulan ZUK ve ZUKİ numunelerinin w_{opt} ve ρ_{kmax} değerleri Tablo 5'te gösterilmiştir.

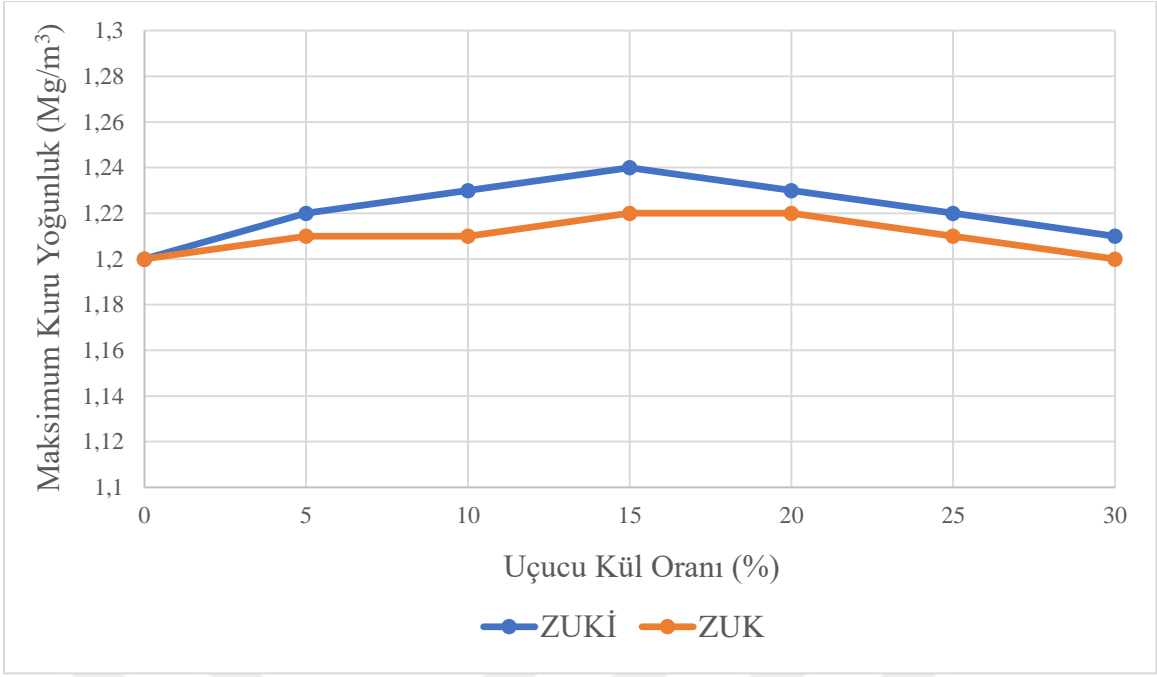
Tablo 5. Numunelerin Kompaksiyon Deney Sonuçları

Numune Adı	Maksimum Kuru Yoğunluk (Mg/m ³)	Optimum su iğeriği (%)
Z	1,20	37,0
ZUKİ5	1,22	33,0
ZUKİ10	1,23	34,0
ZUKİ15	1,24	34,7
ZUKİ20	1,23	35,8
ZUKİ25	1,22	36,6
ZUKİ30	1,21	37,4
ZUK5	1,21	34,0
ZUK10	1,21	35,0
ZUK15	1,22	35,9
ZUK20	1,22	36,7
ZUK25	1,21	37,2
ZUK30	1,20	38,0

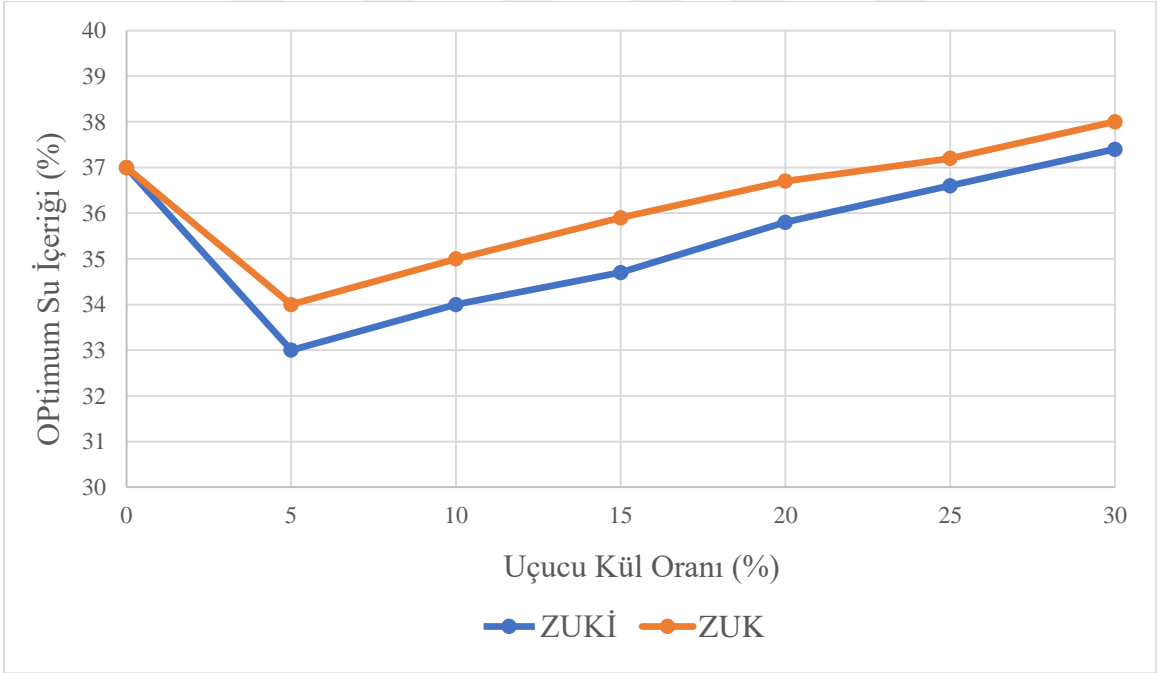
Kompaksiyon deney verileri incelendiğinde doğal zeminin maksimum kuru yoğuluğunun zemine ince veya iri daneli uçucu kül ilavesi ile kayda değer bir şekilde değişmediği belirlenmiştir. Optimum su iğeriği değerleri uçucu kül ilavesi ile birlikte azalmış, artan uçucu kül oranlarında ise artış göstermiştir. Maksimum kuru yoğunluklar 1,20-1,24 Mg/m³ arasında, optimum su içerikleri %33-38 arasında değerler almıştır.

Uçucu külün ince veya iri daneli olmasının kompaksiyon parametreleri üzerinde etkin bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

ZUK ve ZUKİ numunelerine ait kuru yoğunluk değerleri grafiği şekil 19'da, optimum su içerikleri grafiği şekil 20'de verilmiştir.



Şekil 19. Numunelerin maksimum kuru yoğunlukları.



Şekil 20. Numunelerin optimum su içerikleri.

Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri sonuçları.

Tez çalışması kapsamında optimum su içeriği değerleri bulunan Z, ZUK ve ZUKİ numuneleri AASHTO T-193 standardı doğrultusunda CBR deneyine tabi tutulmuştur. CBR dayanımı ve şişme miktarları Tablo 6’da gösterilmiştir.

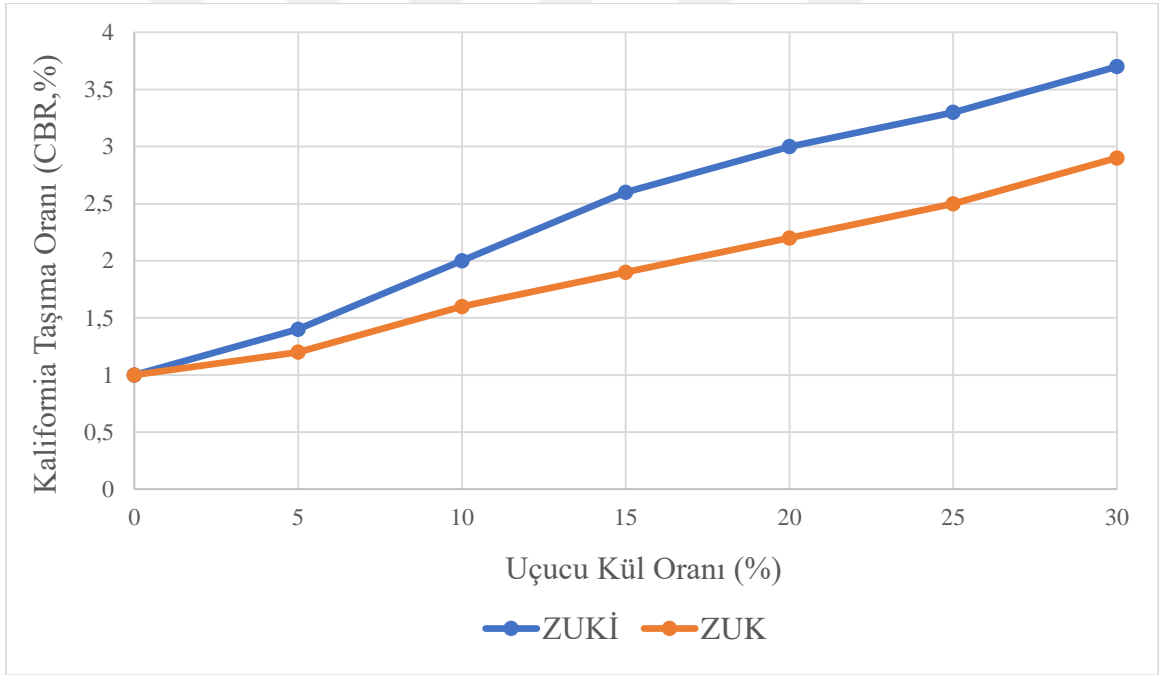
Tablo 6. CBR Deneyi Parametreleri

Numune adı	CBR (%)	Şişme Miktarı (%)
Z	1,0	5,80
ZUKİ5	1,4	5,52
ZUKİ10	2,0	5,15
ZUKİ15	2,6	4,92
ZUKİ20	3,0	4,74
ZUKİ25	3,3	4,41
ZUKİ30	3,7	4,12
ZUK5	1,2	5,69
ZUK10	1,6	5,38
ZUK15	1,9	5,21
ZUK20	2,2	5,10
ZUK25	2,5	4,76
ZUK30	2,9	4,64

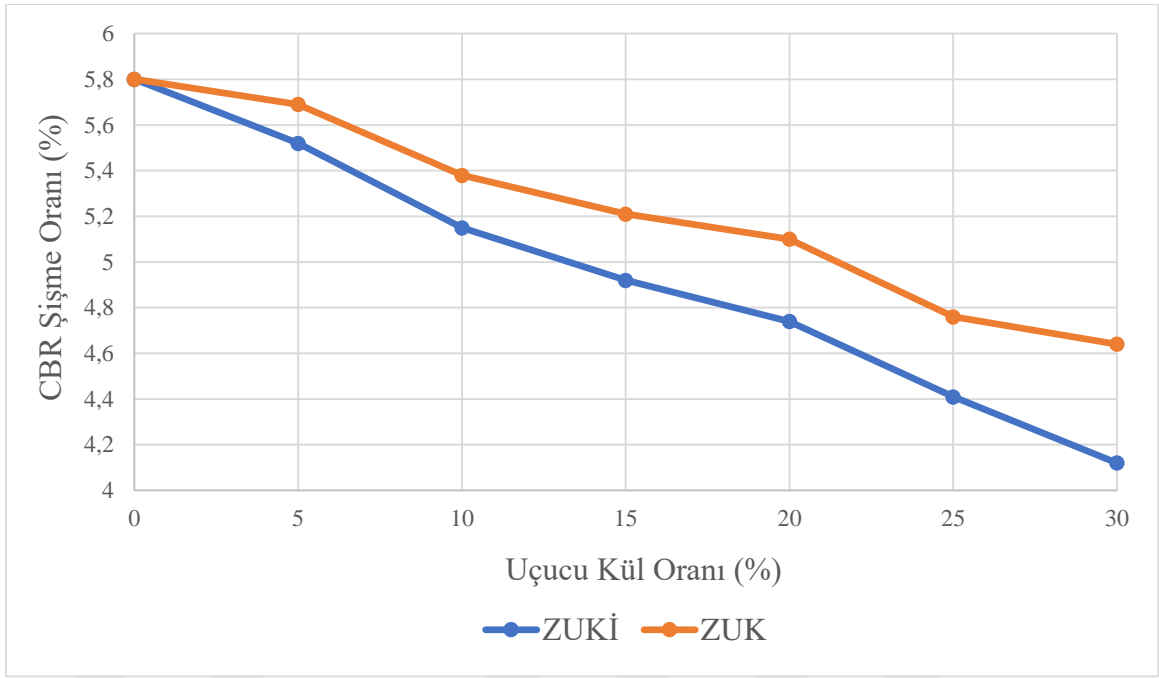
CBR değerleri, boyutu belirli piston ile sıkıştırılıp hazırlanan numuneye belli derinlik değerine ulaşana kadar batabilmesi için gereken basınç değerinin; aynı piston ile gradasyonu düzgün bir kırma taş ile hazırlanan numunenin aynı batma değerini sağladığı basınç oranları şeklinde tanımlanarak yüzde diye ifadesi sağlanan sayısal değerdir (Kavlak, 2008).

Yukarıdaki ifadeler ışığında en düşük CBR dayanım değeri ham zemin (Z) numunesine aittir. En yüksek CBR değeri ZUKİ30 numunesine aittir ve değeri %3,7 olarak belirlenmiştir. Değerin yüksek bir değer olduğu söylenemese de Z numunesine göre yaklaşık 3,7 kat artış sağlamıştır yani %370 oranında artış olduğu gözlemlenmiştir. ZUK30 numunesinin Z numunesine göre ise 2,9 katlık daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir, yani %290 oranında daha yüksek sonuç alınmıştır. ZUK ve ZUKİ numunelerinde katkı oranı arttıkça CBR değerlerinde de artış olduğu gözlemlenmiştir. ZUKİ numunelerinin hepsinde ZUK numunelerine kıyasla daha iyi dayanım sonuçları alınmıştır. En yüksek iri daneli uçucu kül katkılı numune olan ZUK30 numunesinde CBR değeri %2,9; en yüksek ince katkılı olan numune olan ZUKİ30 numunesinde ise %3,7 olarak ölçülmüştür. Yani ZUKİ30 numunesinden ZUK30 numunesine göre yaklaşık %28 daha iyi sonuç alınmıştır. Bu veriler ışığında uçucu kül katkısının inceltilecek kullanılımasının CBR değerlerine pozitif katkı sağladığını söylemek mümkündür.

Şişme miktarları yüzde cinsinden hesaplanmıştır. Numuneler hazırlanıp havuza konulmadan sıfırlanan komparatör saatleri şişme tamamlandıktan sonra ölçülüp kaydedilmiştir. Son değerden ilk değer çıkarılıp çıkan sonuç 100 ile çarpılarak ve numune yüksekliğine bölünmesi ile hesaplaması yapılmıştır. Bu hesaplama ışığında en yüksek şişme hesaplanan numune doğal zemin (Z) olmuştur ve şişme miktarı %5,8 olarak hesaplanmıştır. Tüm numuneler içerisinde en düşük şişme değeri ise ZUKİ30 numunesine aittir ve değeri yaklaşık %4,12'dir. En düşük şişmenin hesaplandığı ZUK numunesi ZUK30'dur ve değeri yaklaşık %4,64 olarak hesaplanmıştır. ZUKİ numunelerinin şişme miktarları aynı miktar katılan ZUK numunelerine göre daha az olmuştur. En iyi şişme değerine sahip ZUKİ30 numunesi %4,12'lik değeri ile ZUK30 numunesinin %4,64'lük değerine göre yaklaşık olarak %10,8 daha az şişme göstermiştir. Deney numunelerinin CBR değerleri sonuçlarına göre hazırlanan grafiği Şekil 21'de, şişme değerleri Şekil 22'de verilmiştir.



Şekil 21. Numunelerin CBR değerleri.



Şekil 22. Numunelerin CBR şişme sonuçları grafiği.

Serbest basınç deneyi sonuçları.

Serbest basınç dayanım değerleri bulunurken önce doğal malzemedan başlanılmıştır. Deneilerde numuneler hazırlanırken Doğal zemine %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında uçucu kül katkısı öğütülmüş ve öğütülmemiş olarak uçucu kül katkısı ayrı ayrı eklenmiştir ve deney numuneleri hazırlanmıştır. Numunelerin 7 ve 28 gün kür süreleri akabinde oluşan serbest basınç deneyi sonuçları Tablo 7’de verilmiştir.

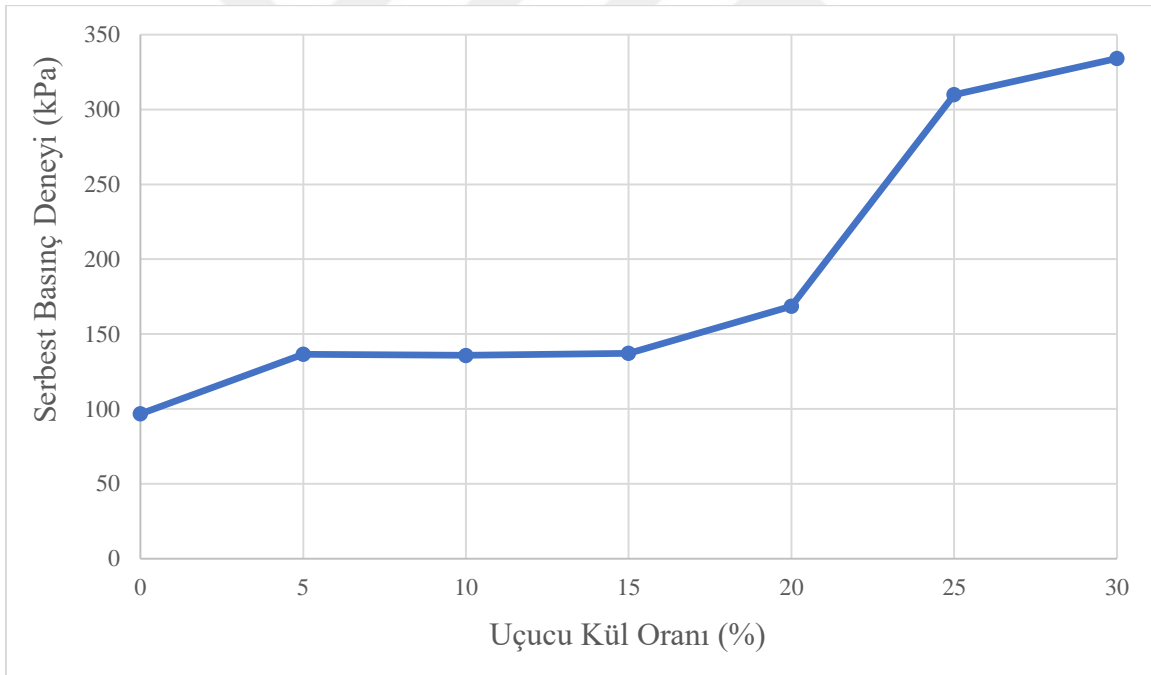
Tablo 7. Numunelerin Tek Eksenli Serbest Basınç Dayanımları

Numune	Tek Eksenli Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	
	Kür Süresi	
	7. Gün	28. Gün
Z	96,74	98,94
ZUKİ5	136,50	217,40
ZUKİ10	135,75	223,95
ZUKİ15	137,10	238,05
ZUKİ20	168,55	292,35
ZUKİ25	309,90	563,35
ZUKİ30	334,10	584,10
ZUK5	130,25	157,85
ZUK10	138,35	158,00
ZUK15	139,95	172,25
ZUK20	141,60	218,90
ZUK25	146,15	239,35
ZUK30	175,80	281,00

Tablo 7. incelendiğinde ZUKİ numunelerine ait serbest basınç deney sonuçları ZUK numunelerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. ZUKİ numunelerinin 7 günlük kür sonuçlarına bakıldığında doğal zemin (Z) numunesinin 96,74 kPa olan değeri %5 ince uçucu kül ilavesi ile 136,5 kPa olmuş, böylece %41,1'lik dayanım artışı olmuştur. %5, %10, %15 oranlarında ince uçucu kül ilavesi ile oluşturulan numunelerin değerlerinde önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür. ZUKİ20 numunesinin 168,55 kPa olan değeri Z numunesinin 96,74 kPa olan değerine göre %74 civarı bir dayanım artışı sağlamıştır.

ZUKİ20 numunesi ZUKİ15 numunesine göre %23'e yakın bir dayanım artışı ortaya koymuştur. ZUKİ25 numunesinde ZUKİ20 numunesine göre yaklaşık %84'lük ciddi bir dayanım artışı sağlamıştır. ZUKİ30 numunesi ZUKİ25 numunesine göre yaklaşık %8'lik bir dayanım artışı sağlamıştır. Z numunesi ile kıyaslanacak olursa ZUKİ20 numunesi yaklaşık %74'lük, ZUKİ25 numunesi yaklaşık %220'lik, ZUKİ30 numunesi yaklaşık %245'lik bir dayanım artışı sağlamıştır.

ZUKİ numunelerinin 7 günlük kür sonuçları şekil 23'te verilmiştir.

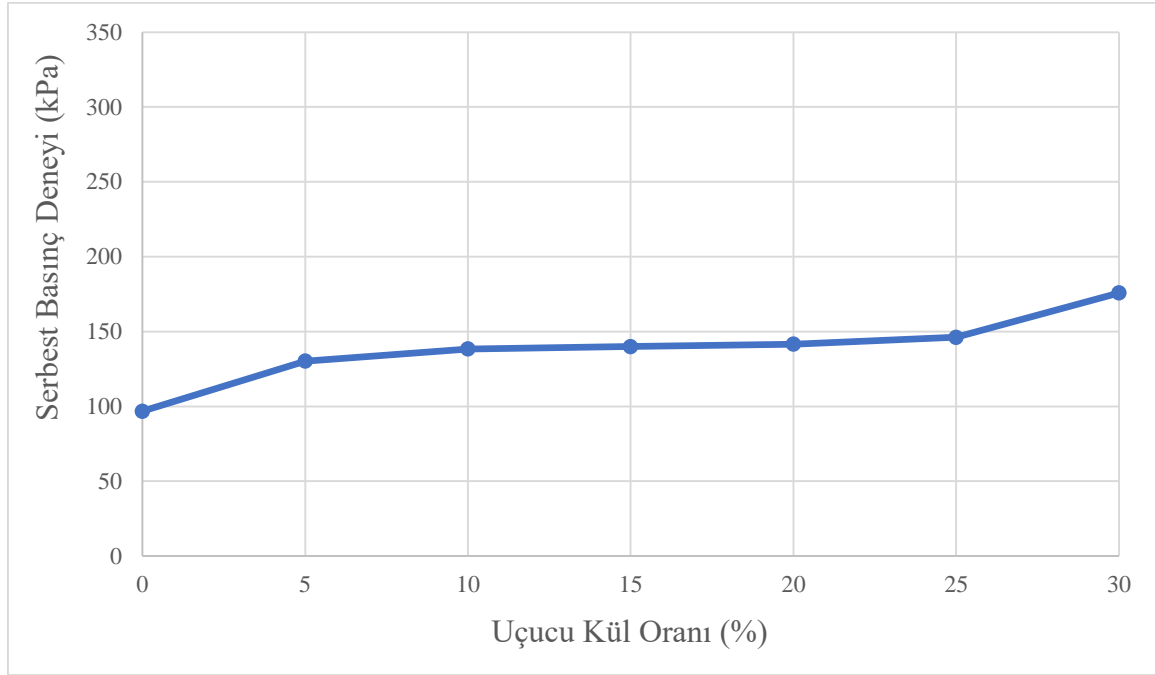


Şekil 23. ZUKİ numunelerinin 7 günlük serbest basınç deney sonuçları.

ZUK numunelerinin 7 günlük kür sonuçlarına bakıldığında ham zemin (Z) numunesine göre %5, %10, %15, %20, %25 kalın uçucu kül katkılı numunelerin sırasıyla %35, %43, %45, %46, %51 oranlarında dayanım artışı gösterdiği tespit edilmiştir. ZUK30 numunesinin Z numunesine göre dayanım artışı ise %82 olarak belirlenmiştir.

ZUK5 numunesinde Z numunesine göre %35 dayanım artışı, ZUK10 numunesinin ZUK5 numunesine göre %6 dayanım artışı, ZUK15 numunesinde ZUK10 numunesine göre %1 dayanım artışı, ZUK20 numunesinde ZUK15 numunesine göre %1 dayanım artışı, ZUK25 numunesinde ZUK20 numunesine göre %3 dayanım artışı, ZUK30 numunesinde ZUK25 numunesine göre %20 dayanım artışı olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.

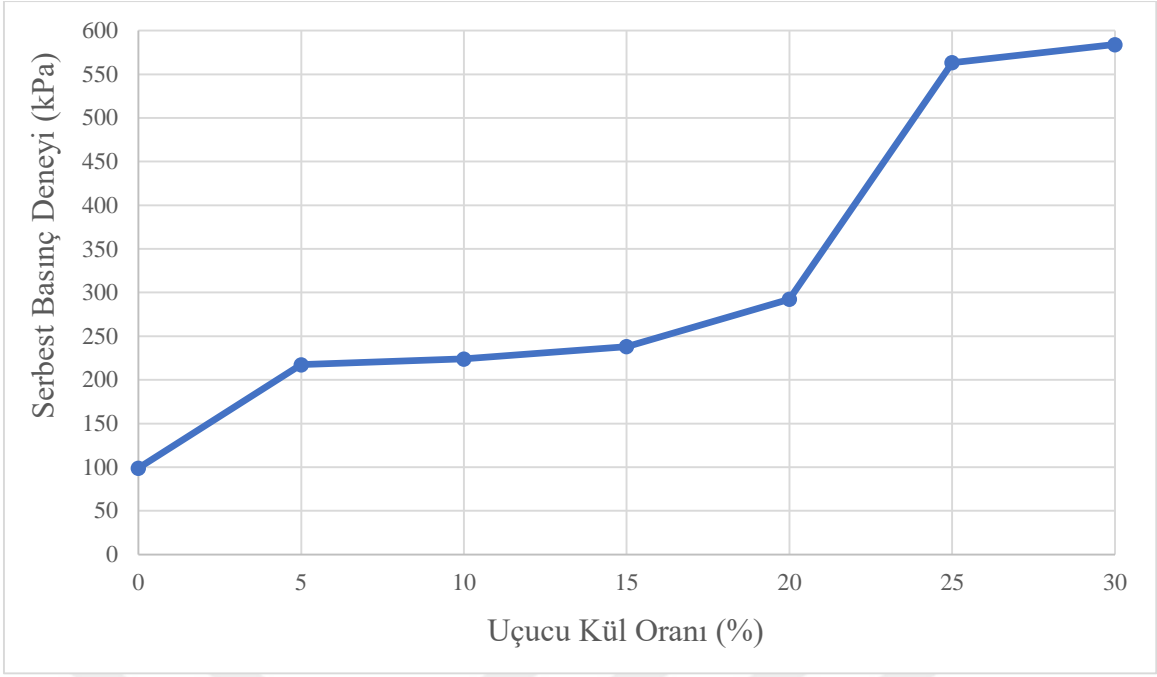
ZUK numunelerine ait 7 günlük kür sonuçlarının grafiği Şekil 24'te verilmiştir.



Şekil 24. ZUK numunelerinin 7 günlük serbest basınç deney sonuç.

ZUKİ numunelerinin 28 günlük kür sonuçlarına bakıldığında ZUKİ5 numunesinde Z numunesine göre %120, ZUKİ10 numunesinde %126, ZUKİ15 numunesinde %140, ZUKİ20 numunesinde %195, ZUKİ25 numunesinde %470, ZUKİ30 numunesinde %490 dayanım artışı meydana gelmiştir.

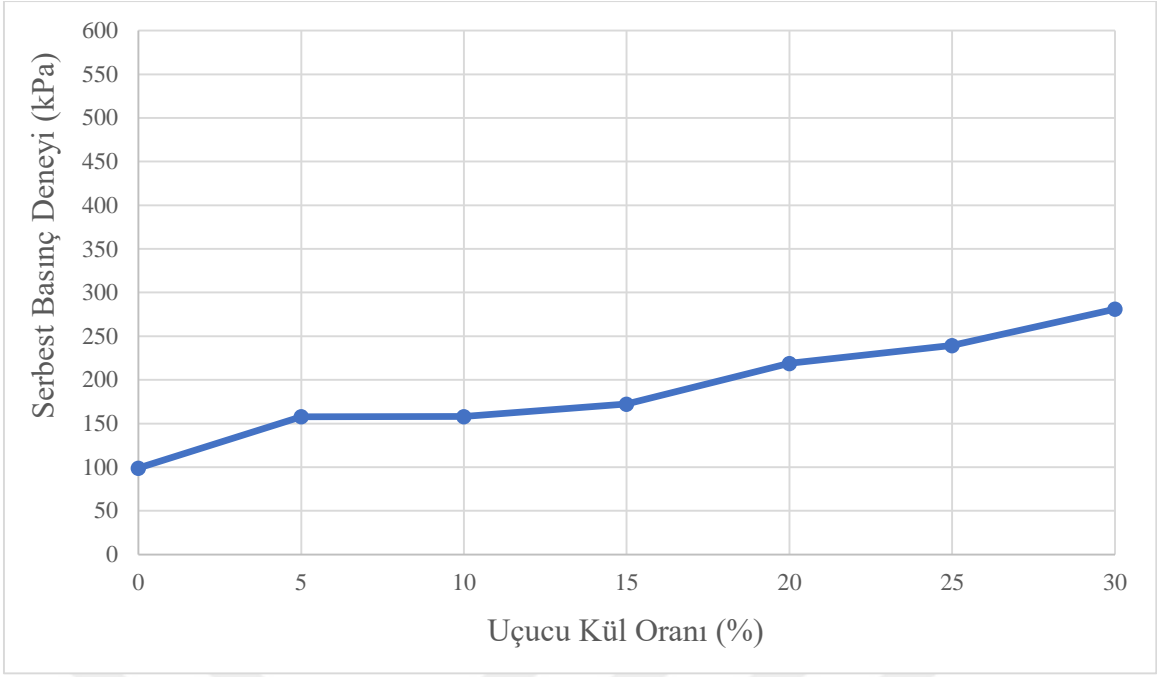
ZUKİ5 numunesinde Z numunesine göre %120, ZUKİ10 numunesinde ZUKİ5 numunesine göre %3, ZUKİ15 numunesinde ZUKİ10 numunesine göre %6, ZUKİ20 numunesinde ZUKİ15 numunesine göre %23, ZUKİ25 numunesinde ZUKİ20 numunesine göre %93, ZUKİ30 numunesinde ZUKİ25 numunesine göre %4 dayanım artışı belirlenmiştir. ZUKİ numunelerine ait 28 günlük kür sonuçları grafiği şekil 25'te verilmiştir.



Şekil 25. ZUKİ numunelerinin 28 günlük serbest basınç deney sonuçları.

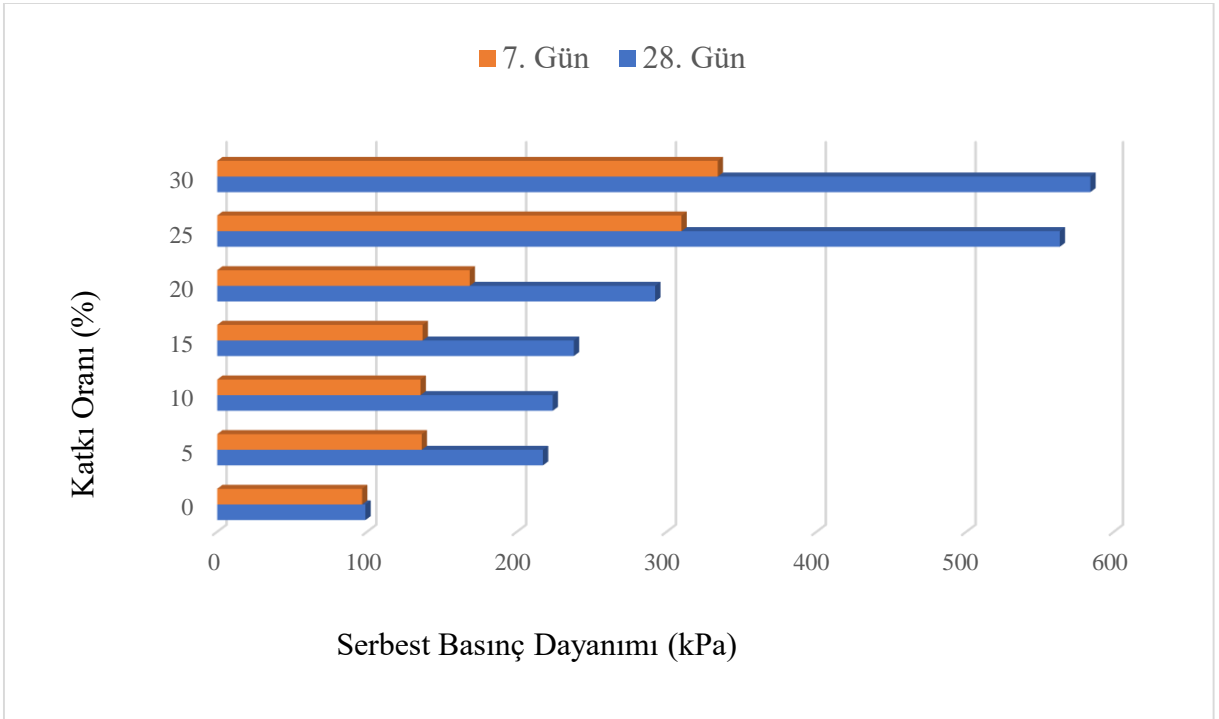
ZUK numunelerinin 28 günlük kür sonuçları incelendiğinde ZUK5 numunesinde Z numunesine göre %59,5, ZUK10 numunesinde %59,7, ZUK15 numunesinde %74 dayanım artışı, ZUK20 numunesinde %121, ZUK25 numunesinde %142, ZUK30 numunesinde %184 dayanım artışı olduğu hesaplanmıştır. ZUK5 numunesinde Z numunesine göre %59,5, ZUK10 numunesinde ZUK5 numunesine göre %0,1, ZUK15 numunesinde ZUK10 numunesine göre %9, ZUK20 numunesinde ZUK15 numunesine göre %27, ZUK25 numunesinde ZUK20 numunesine göre %9, ZUK30 numunesinde ZUK25 numunesine göre %17 dayanım artışı olduğu belirlenmiştir.

ZUK numunelerinin 28 gün kür sonucunda elde edilen verilere göre hazırlanan grafiği Şekil 26' da verilmiştir.



Şekil 26. ZUK numunelerinin 28 günlük serbest basınç deney sonuçları.

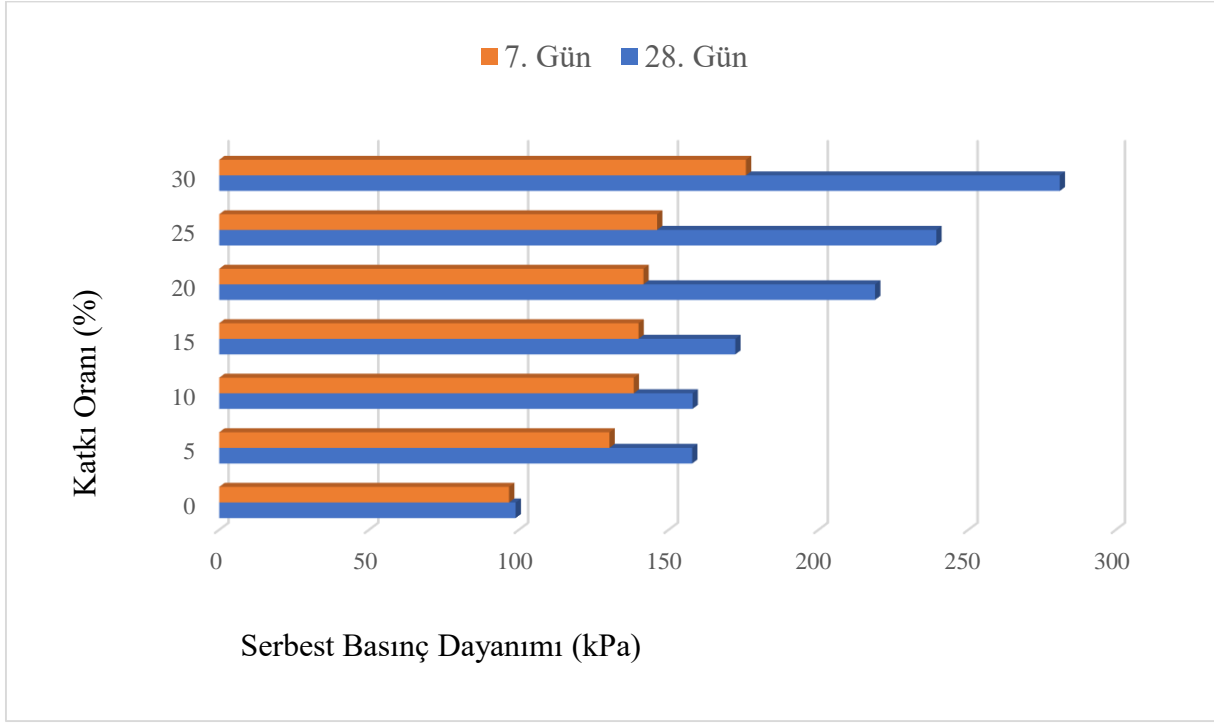
ZUKİ numunelerinde 7 ile 28 gün kür sonrasındaki dayanım sonuçları kıyaslandığında 28 günlük kür sonuçlarının 7 günlük kür sonuçlarına göre; Z numunesinde %2, ZUKİ5 numunesinde %59, ZUKİ10 numunesinde %65, ZUKİ15 numunesinde %74, ZUKİ20 numunesinde %73, ZUKİ25 numunesinde %82, ZUKİ30 numunesinde %75 dayanım artışı meydana getirdiği tespit edilmiştir. ZUKİ numunelerine ait 7. ve 28. gün sonucunda alınan sonuçlara göre oluşturulan grafik Şekil 27 aracılığıyla aktarılmıştır.



Şekil 27. ZUKİ numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç deneyi karşılaştırmalı grafiği.

ZUK numunelerinde 7 ile 28 gün kür sonrasındaki dayanım sonuçlarını kıyaslandığında 28 günlük kür sonuçlarının 7 günlük kür sonuçlarına göre; Z numunesinde %2, ZUK5 numunesinde %21, ZUK10 numunesinde %14, ZUK15 numunesinde %23, ZUK20 numunesinde %55, ZUK25 numunesinde %64, ZUK30 numunesinde %60 dayanım artışı meydana getirdiği belirlenmiştir.

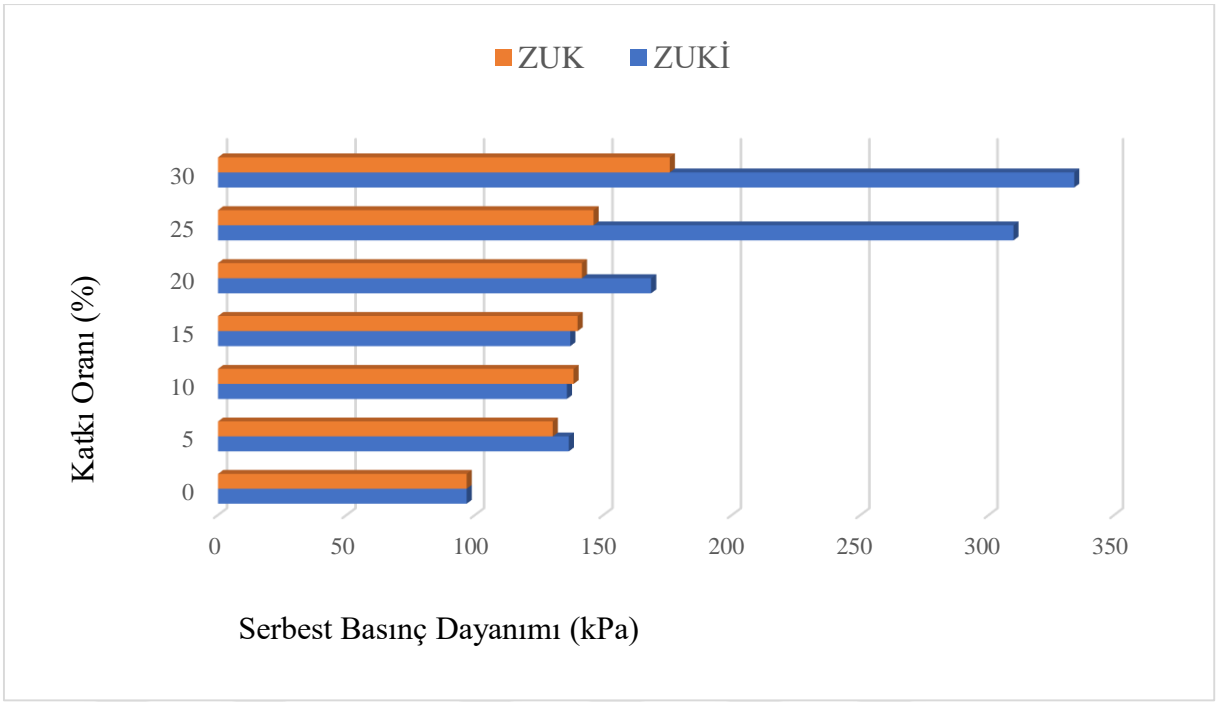
ZUK numunelerine ait 7. ve 28. Gün sonucunda alınan sonuçları Şekil 28'de verilmiştir.



Şekil 28. ZUK numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç deneyi karşılaştırmalı grafiği.

7 günlük kür sonuçları göz önüne alındığında %5, %10, %15 katkılı numunelerde ZUK ve ZUKİ numuneleri arasında önemli farklar oluşmadığı görülmektedir. ZUK20 ve ZUKİ20 numuneleri arasında az miktarda fark oluşmakla beraber, %25 ve %30 katkılı numuneler ZUK ve ZUKİ numuneleri arasında ciddi farklar oluştuğu görülmektedir.

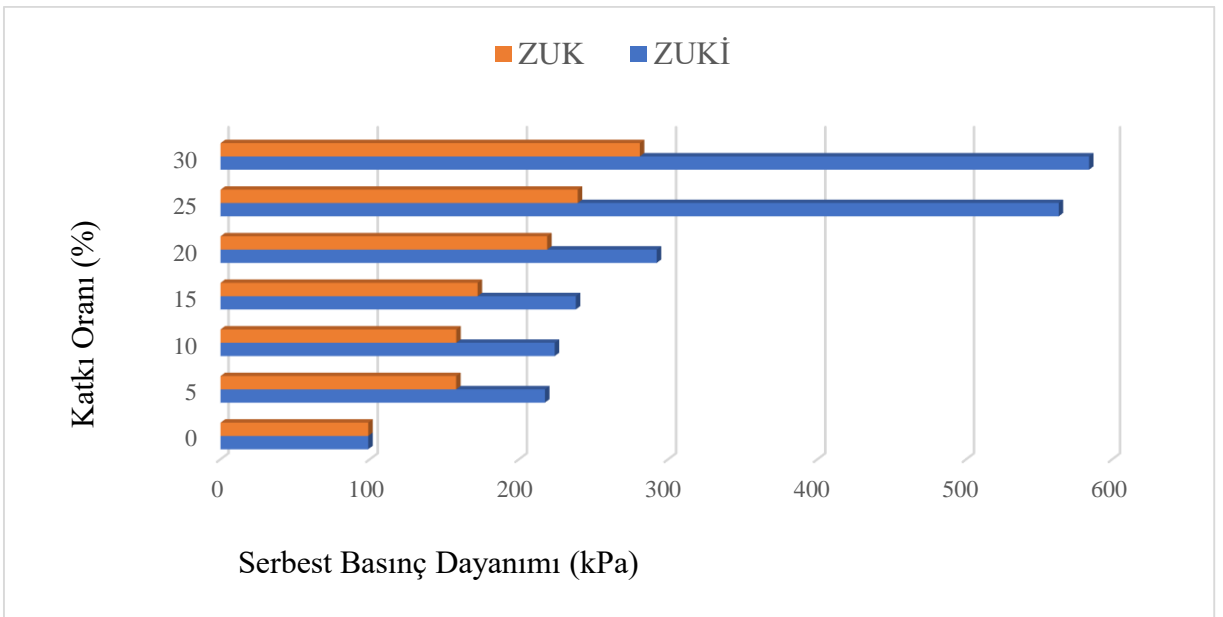
ZUK ve ZUKİ numunelerinin 7 günlük kür sonucunda oluşan serbest basınç deneyi dayanım sonuçları Şekil 29 vasıtasıyla aktarılmıştır.



Şekil 29. ZUK ve ZUKİ numunelerinin 7 günlük serbest basınç deneyi karşılaştırmalı grafiği.

28 günlük kür sonuçları göz önüne alındığında %5, %10, %15, %20 katkılı numunelerde ZUK ve ZUKİ numuneleri arasında bir miktar fark olduğu görülmektedir. %25 ve %30 katkılı numuneler bakımından ZUK ve ZUKİ numuneleri arasında ciddi farklar olduğu tespit edilmiştir.

ZUK ve ZUKİ numunelerinin 28 günlük kür sonucunda oluşan serbest basınç deneyi dayanım sonuçları Şekil 30 vasıtasıyla aktarılmıştır.



Şekil 30. ZUK ve ZUKİ numunelerinin 28 günlük serbest basınç deneyi karşılaştırmalı grafiği.

Serbest basınç dayanımı verileri incelendiğinde gerek 7 gün gerekse 28 günlük kür süreleri ardından uçucu külün dane boyutunun inceltilmesinin dayanım verilerini artırdığı sonucuna varılmıştır. Maksimum dayanım verileri uçucu külün %30 oranında katılması sonucu elde edilmiştir. ZUK numunelerinde 7 günlük kür süresi sonunda doğal zemine göre maksimum dayanım artışı %82 iken ZUKİ numunelerinde bu oran %245'e çıkmıştır. Aynı şekilde 28 günlük kür sonunda ZUK numunelerinde doğal zemine göre maksimum dayanım artışı %184 iken ZUKİ numunelerinde bu oran %490'dır. Bu sonuçlar uçucu külün inceltilmesinin dayanım üzerindeki etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır.



BEŞİNCİ BÖLÜM

Sonuçlar ve Öneriler

Yüksek plastisiteli killerde uçucu kül kullanılarak stabilizasyon uygulamasını ele alan bu tez çalışmasında aşağıda belirtilmiş bulunan sonuçlara ulaşılmıştır.

- Yüksek plastisiteli kil olan doğal zemine katkı eklendikçe uçucu kül katkısının artmasıyla birlikte LL ve PI değerlerinde sürekli düşüşler meydana gelmiştir. PL değerlerinde ise katkı oranının artışı ile birlikte sürekli artışlar görülmüştür.
- Aynı oranda karıştırılan ince ve iri katkılar neticesinde ZUKİ numunelerinin ZUK numunelerine göre PL değerleri yüksek çıkmıştır. LL ve PI değerleri ise düşük çıkmıştır.
- LL ve PI değeri en düşük ölçülen %30 ince uçucu kül katkılı ZUKİ30 numunesinin PL değeri ise en yüksek çıkmıştır.
- Maksimum kuru yoğunluk değerleri katkılı numunelerde doğal zemine göre küçük miktarda artmıştır. Bununla birlikte numuneler arasında ciddi bir fark gözlemlenmemiştir. ZUKİ numunelerindeki artışlar ZUK numunelerine göre belirgin düzeyde değildir. İri uçucu kül katkılı ZUK numunelerinin genellikle optimum su içerikleri minimal düzeyde olmakla birlikte bir miktar daha fazla çıkmıştır.
- CBR değerlerinde, doğal zemin (Z) numunesine göre hem ZUK hem ZUKİ numunelerinde artan katkı oranları ile birlikte bariz artışlar görülmüştür. CBR şişme yüzdeleri, katkı oranları arttıkça sürekli olarak düşmüştür. ZUKİ numuneleri ZUK numunelerine kıyasla daha olumlu sonuçlar vermiştir. En iyi CBR sonucunun alındığı ZUKİ30 numunesinin CBR değeri %1 olarak ölçülen (Z) numunesine göre %270 artışla %3,7 olarak belirlenmiştir. CBR şişme yüzdesi en az olarak ölçülen ZUKİ30 numunesinin şişme yüzdesi, en fazla değere sahip Z numunesinin %5,8 olan değerinin %29 azalmasıyla %4,12 olarak belirlenmiştir.
- Serbest basınç deneylerine göre hem ZUK hem ZUKİ numunelerinde alınan sonuçlar doğal zemine göre artışlar göstermiştir. 7 günlük kür sonuçlarına göre Z numunesinin 96,74 kPa'lık değerine kıyasla, ZUKİ numunelerinde %41 ile %245 arasında dayanım artışı görülmüştür. En yüksek dayanım 334,10 kPa değeri ile ZUKİ30 numunesindedir. ZUK numunelerinde en iyi sonuç veren ZUK30 numunesi Z numunesine göre %82'lik artış sağlamıştır.

- 28 günlük kür sonrası dayanım verilerine göre ZUKİ numunelerinin Z numunesine göre %120 ile %490 arasında dayanım artışı sağladıkları belirlenmiştir. En yüksek dayanım 584,10 kPa ile ZUKİ30 numunesinden elde edilmiştir.
- ZUK numuneleri Z numunesine göre %59,5 ile %184 arası dayanım artışları göstermiştir. 281 kPa değeri ile en iyi dayanımı sağlayan ZUK30 numunesidir.
- 7 ile 28 günlük sonuçlar karşılaştırıldığında, ZUKİ numunelerinde ZUK numunelerine göre yüksek dayanım artışları tespit edilmiştir.
- Öğütülmüş (ince) uçucu kül kullanılarak oluşturulan numunelerin iri katkılı olan numunelere göre CBR ve dayanım değerleri daha yüksektir. Bu sonuçlar uçucu kül inceliğinin dayanım ve CBR zerindeki etkisini açıkça ortaya koymuştur.

Benzeri konularda yapılabilcek olan bilimsel araştırma çalışmalarında değerlendirilebilecek öneriler řu şekilde sıralanabilir:

- Zemin stabilizasyonu konusunda farklı katkılarda incelik durumunun sonuçları araştırılabilir. Ayrıca, farklı zemin tiplerinde uucu kln incelik etkisi araştırılabilir.
- Bu alışma kapsamındaki deneyler arazi deneyleri ile karşılaştırılabilir.

Kaynakça

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (AASHTO). (1993). *Guide for desing of pavement structures*. Washington D.C.: AASHTO.
- ASTM C 618, (2002). *Annual Book of ASTM Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete*, ASTM, Pennsylvania.
- Atterberg, A. (1911). The behaviour of clays with water, their limits of plasticity and their degrees of plasticity, *Kungliga Lantbruksakademiens Handlingor Och Tidskrift*, 50/2, 132-158.
- Aytekin, M. (2004). *Deneysel Zemin Mekaniği*, (2. Baskı). Ankara: Teknik Yayınevi, 217-218.
- Brooks, R. M. (2009). Soil Stabilization with Flyash and Rice Husk Ash. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*. 1, 3, 209-217.
- Buhler, R. L., & Cerato, A. B. (2007). Stabilization of Oklahoma Expansive Soils Using Lime and Class C Fly Ash. *GeoDenver Congress: New Peaks in Geotechnics*. 1-10.
- Cedergren, H. R. (1989). *Seepage, Drainage, and Flow Nets* (3.Baskı). Florida: John Wiley and Sons Inc., 232-255.
- Çakır, M. (2001). *Uçucu küllerin zemin stabilizasyonunda kullanımı*, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 98397)
- Çakılcıoğlu, İ. (2007). *Yüksek plastisiteli killerin stabilizasyonu*, (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 216270)
- Çetin, A. Y. (2011). *Yüksek plastisiteli kil zeminlerin alternatif malzemeler ile yüzeysel zemin stabilizasyonu*, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 295471)
- Demir, E. (2019). *Yüksek plastisiteli kil stabilizasyonunda silis dumanı ve mermer atıklarının kireçle beraber kullanılabilirliğinin araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi), Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bayburt. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 576017)
- Edil, T. B., Acosta, H. A., & Benson, C. H. (2006). Stabilizing soft fine grained soils with fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 18, 2, 283-294.
- Edil, T. B., Benson, C. H., Bin-Shafique, M. S., Kim, W., Tanyu, B. F., & Senol, A. (2002). Field evaluation of construction alternatives for roadway over soft subgrade, record no. 1786, *Transportation Research Board*, Washington, 36-48.
- Eren, S., & Filiz, M. (2009). Comparing the conventional soil stabilization methods to the consolid system used as an alternative admixture matter in ısparta darıdere material. *Construction and Building Materials*. 23, 2473-2480.
- Erkan, İ. H.(2007). *Yumuşak killi zeminlerin kireç kolonlarıyla mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 212405)

- Fang, H. Y. (1991). *Foundation Engineering Handbook* (2. Baskı), Londra: Van Nostrand Reinhold Publishing.
- Ferguson, G., (1993). Use of Self-Cementing Fly Ash as a Soil Stabilization Agent, ASCE, *Fly as for Soil Improvement, Geotechnical Special Publication*, Sayı:36, S.1-14 .
- Fidan, D. (2016). *Killerin stabilizasyonunda doğal puzolanik katkı maddesi inceliğinin dayanım ve durabiliteye etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 44951)
- Ghabae, S.(2015). *Kireç ile stablize edilmiş bentonitin kür süresinin mukavemet üzerindeki etkisi*, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. <https://polen.itu.edu.tr/xmlui/handle/11527/14014>
- Hausmann, M. R. (1990). *Engineering Principles of Ground Modification*. McGraw-Hill. New York. 632.
- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. & Eren, K., (2001). *Asfalt ve Uygulamaları*, (İSFALT Bilimsel Yayınları), No:1, 280.
- Kavlak, Y. , (2008). *Isparta gelincik pomzasının karayolu esnek üstyapıları taban zemini stabilizasyonunda kullanımı*. (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 237278)
- Kızılcılık, M. M. (2010). *Yüksek plastisiteli bir kilin kireç ile stabilizasyonu*, (Yüksek Lisans Tezi), Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 275771)
- Kocabey, S. (2019). *Düşük plastisiteli killerin kireçle stabilizasyonunda inceliğin etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi). Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bayburt. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 533972)
- Kukko, H. (2000). *Stabilization of Clay with Inorganic Products*. Journal of Materials In Civil Engineering. 12, 4, 307-309.
- Kumar, A., Walia, B. S., & Bajaj, A. (2007). Influence of fly ash, lime and polyester fibers on compaction and strength properties of expansive soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 19, 3, 242-248.
- Kumar, B. R. P., & Sharma, R. S. (2004). Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 130, 7, 764-767.
- Lambe, P.C., Khosla, N. P., & Jayaratne, N.N. (1990). *Soil Stabilization in Pavement Structures*, Report No. 232411-88-1, Transportation Studies Research, Sacramento, 545-589.
- Lin, D. F., Lin, K. L., & Luo, H. L. (2007). A comparison between sludge ash and fly ash on the improvement in soft soil. *Journal of the Air-Waste Management Association*. 57, 59-64.
- Little, N. D. (1987). Fundamentals of the stabilization of soil with lime, national lime association, No. 232, Arlington, 19-20.
- Mollamahmutoğlu, M., Yılmaz, Y., & Güngör, A. G. (2009). Effect of a class c fly ash on the geotechnical properties of an expansive soil. *Int. Journal of Eng. Research Development*. 1, 1, 1-6

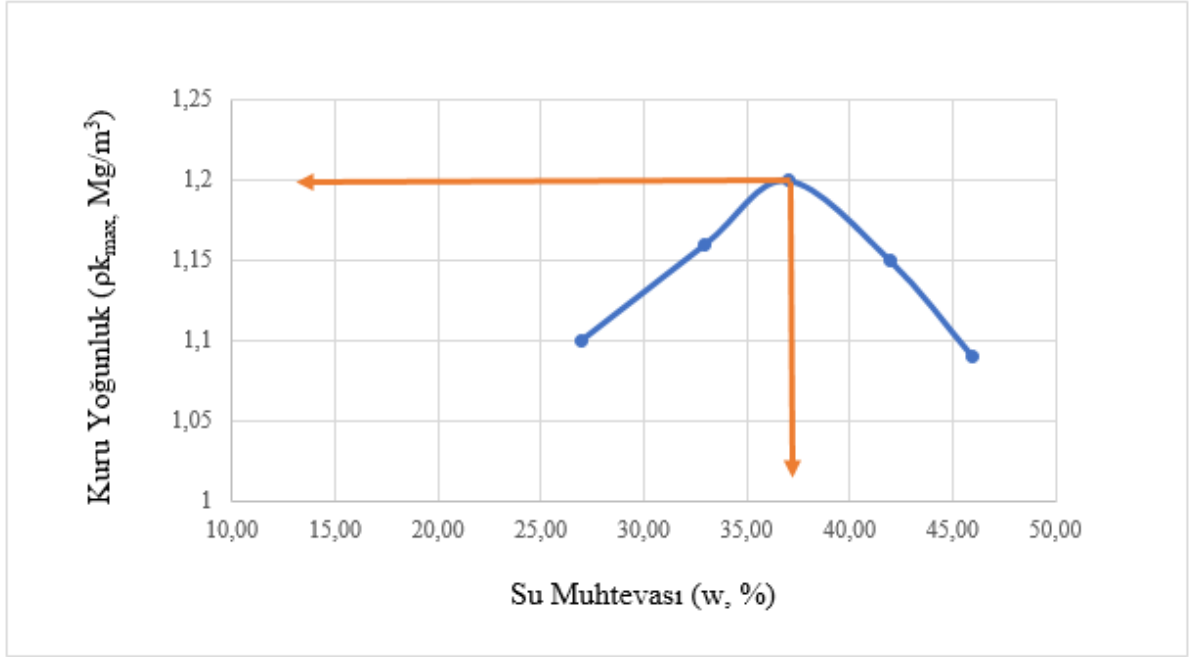
- Öksüz, K. (2006). *Afşin-Elbistan termik santrali uçucu külünün zemin stabilizasyonunda kullanımı*, (Yüksek Lisans Tezi), Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana. <http://libratez.cu.edu.tr/tezler/5956.pdf>
- Önalp, A. (1983). *İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi* (Cilt 2). Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayın No: 3. 1225s.
- Özaydın, K. (1989). *Zemin Mekaniği*, İstanbul: Birsen Yayınevi, 261.
- Özaydın, K. (2012). *Zemin İyileştirme Teknikleri*, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 14. Ulusal Kongresi, Isparta.
- Özdemir, A. & Özdemir, M. (2006). Zayıf zeminlerin iyileştirilmesi ve son yıllarda yaygın olarak uygulanan bazı zemin iyileştirme yöntemleri, (*Sondaj Dünyası*), 3, 34-38.
- Sağlamer, A. (1985). *Zemin Islah Metotları, Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri*, DSİ Genel Müdürlüğü, Adana.
- Seco, A., Ramírez, F., Miqueleiz, L., & García, B. (2011). *Stabilization of Expansive Soils for Use in Construction*. Applied Clay Science. 51, 348-352.
- Taş, M. (2020). *Uçucu kül, Bayburt taşı ve mermer tozu endüstriyel atıklarının zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğinin araştırılması*, (Yüksek Lisans Tezi), Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bayburt. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 609976)
- TS 639, (1975). *Uçucu Küller*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 1500, (2000). *İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırması* (I. Baskı), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 1900 – 1 (2006). *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tumluer, G. (2006). *Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti*, (Yüksek Lisans Tezi), Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 183645)
- Tunç, A. (2002). *Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları*, İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım, 912.
- Uzuner, B.A. (2000). *Temel Mühendisliğine Giriş* (2.Baskı). Trabzon: Derya Kitabevi, 245-270
- Uzuner, B. A. (2006). *Temel Mühendisliğine Giriş* (3.Baskı). Trabzon: Derya Kitabevi, 310-360.
- Uzuner, B. A. (2013). *Temel Mühendisliğine Giriş* (5.Baskı). Trabzon: Derya Kitabevi, 342-359.
- Van Impe, W. F. (1989). *Soil Improvement Techniques and Their Evolution*, Rotterdam: A.A. Balkema, 125.
- Winterkorn, H. F. & Fang, H. Y. (1975). *Foundation Engineering Handbook*, Londra: VanNostrand Reinhold Publication, 176.
- Yarbaşı, N., Kalkan, E., & Akbulut, S. (2007). Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives. *Cold Regions Science and Technology*. 48, 44-54.
- Yıldırım, S. (2002). *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı*, İstanbul: Birsen Yayınevi, 466.

Yılmaz, F. (2016). *Use of Fly Ash in Ground Stabilization*. 3rd International Symposium on Environment and Morality. 4-6 November 2016, Alanya - Turkey.

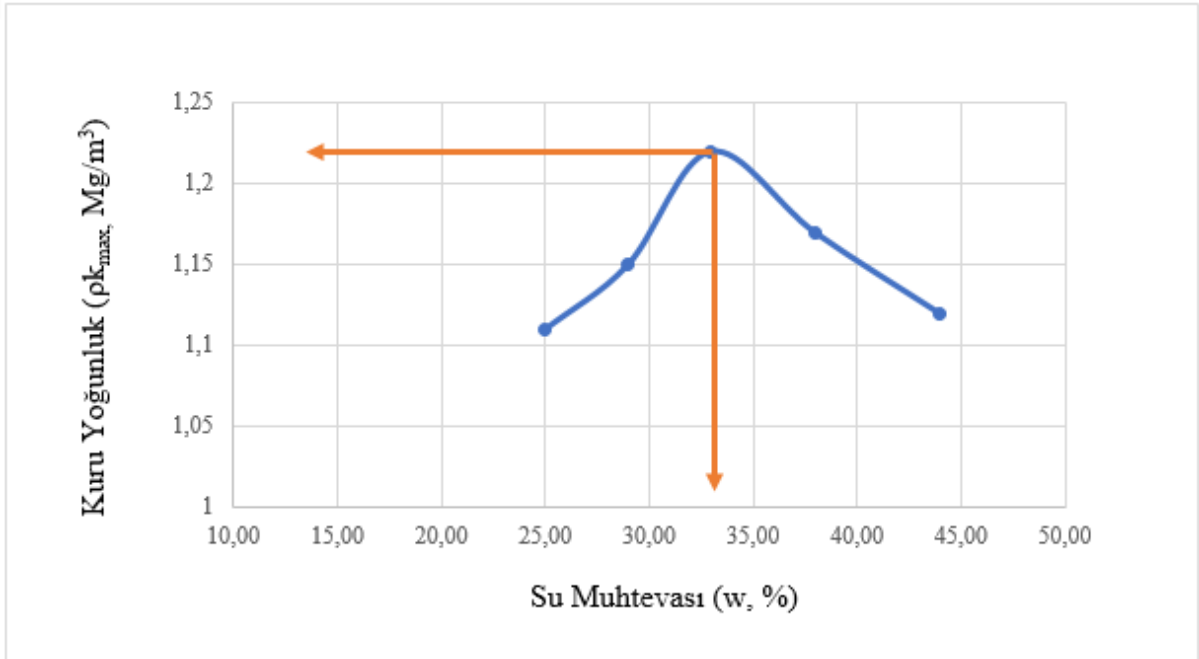


Ekler

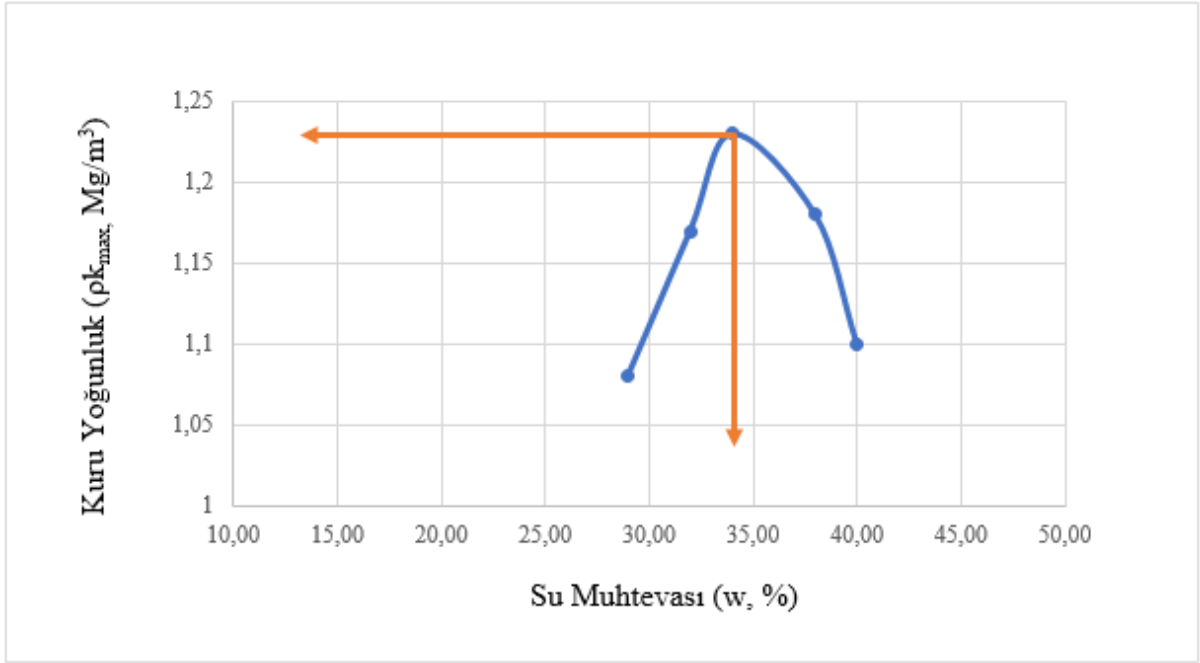
EK-1: Kompaksiyon Deneylerinin Sonuçları



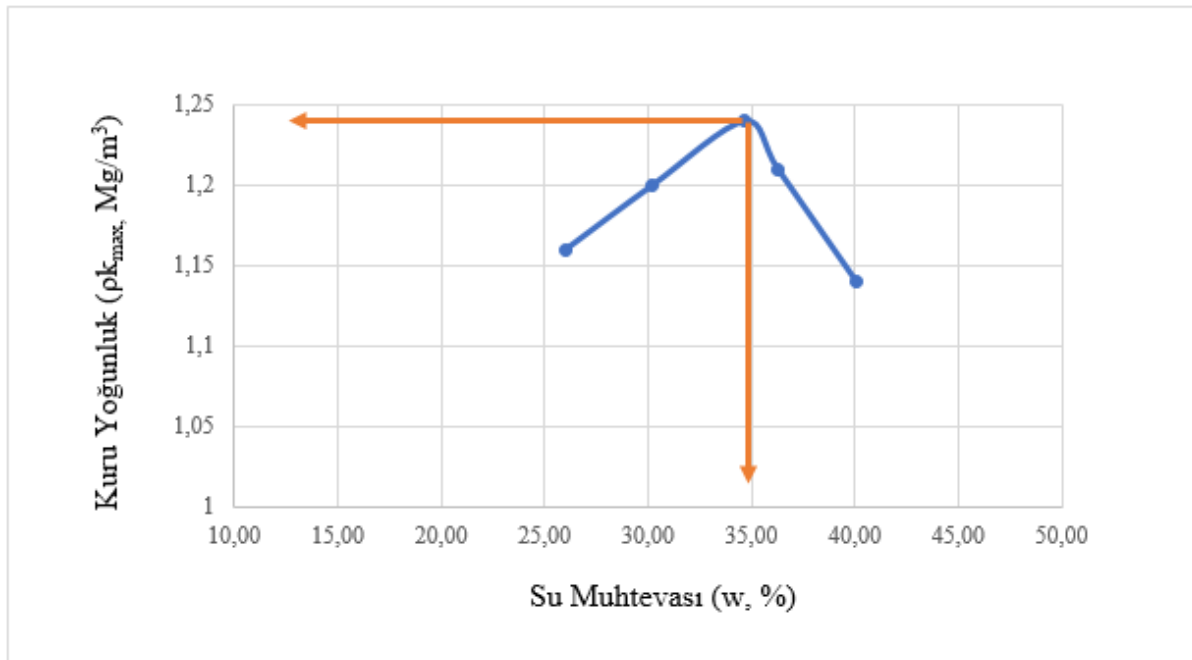
Şekil 31. Doğal zeminin kompaksiyon eğrisi.



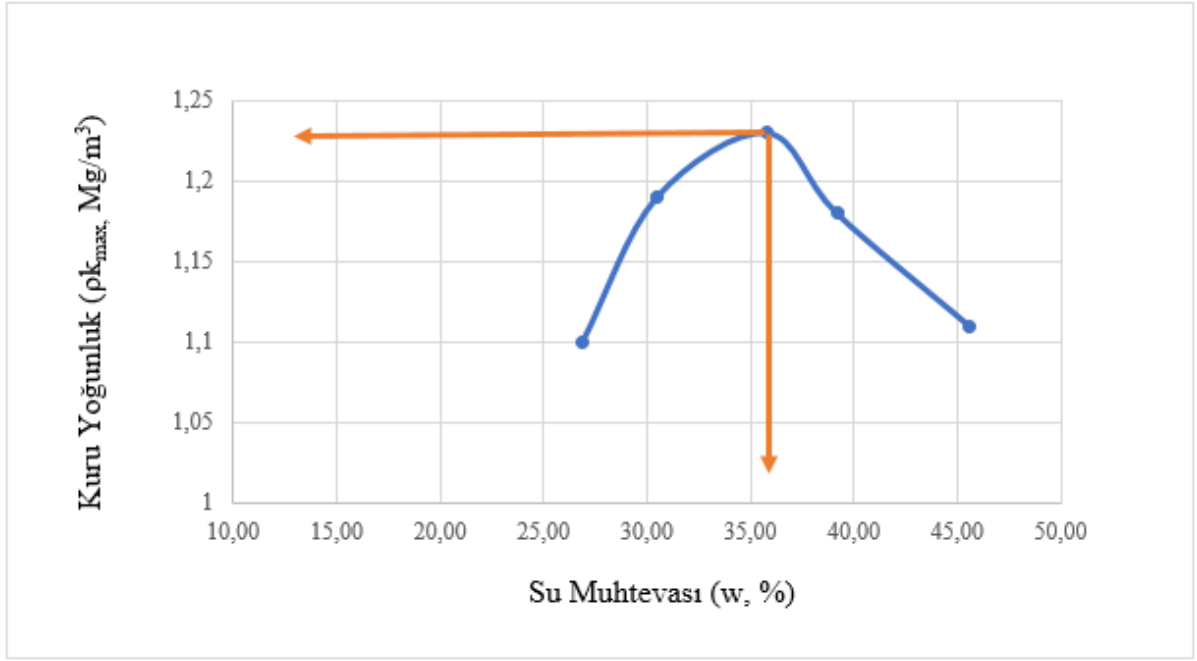
Şekil 32. ZUKİ5 numunesinin kompaksiyon eğrisi.



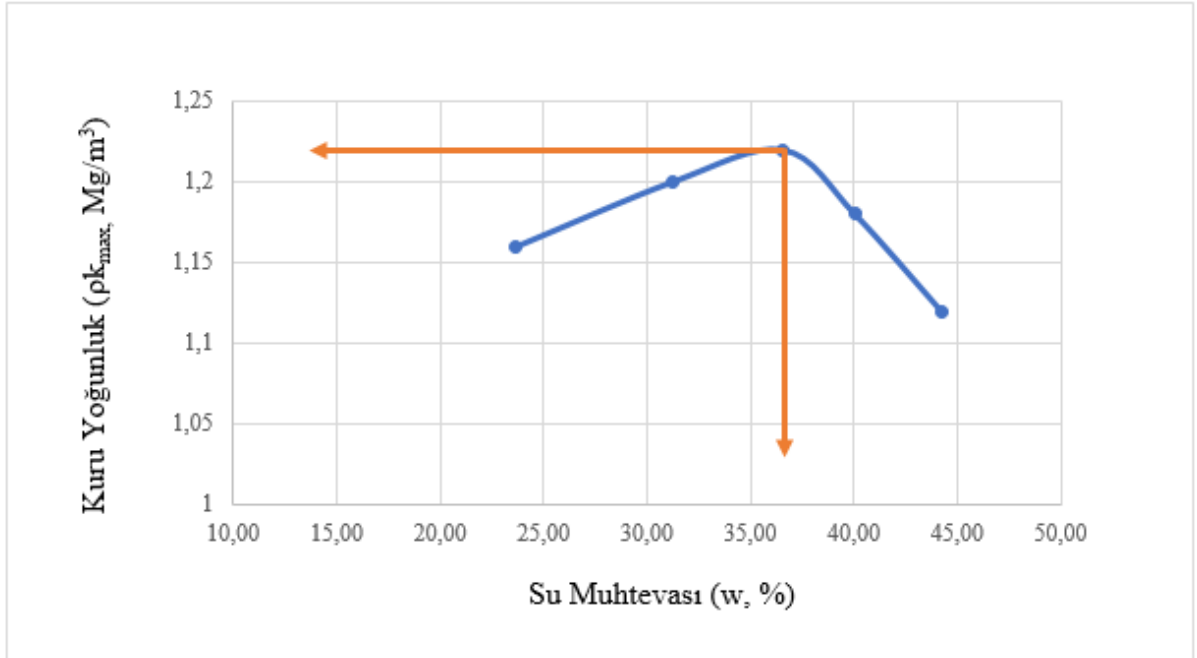
Şekil 33. ZUKİ10 numunesinin kompaksiyon eğrisi.



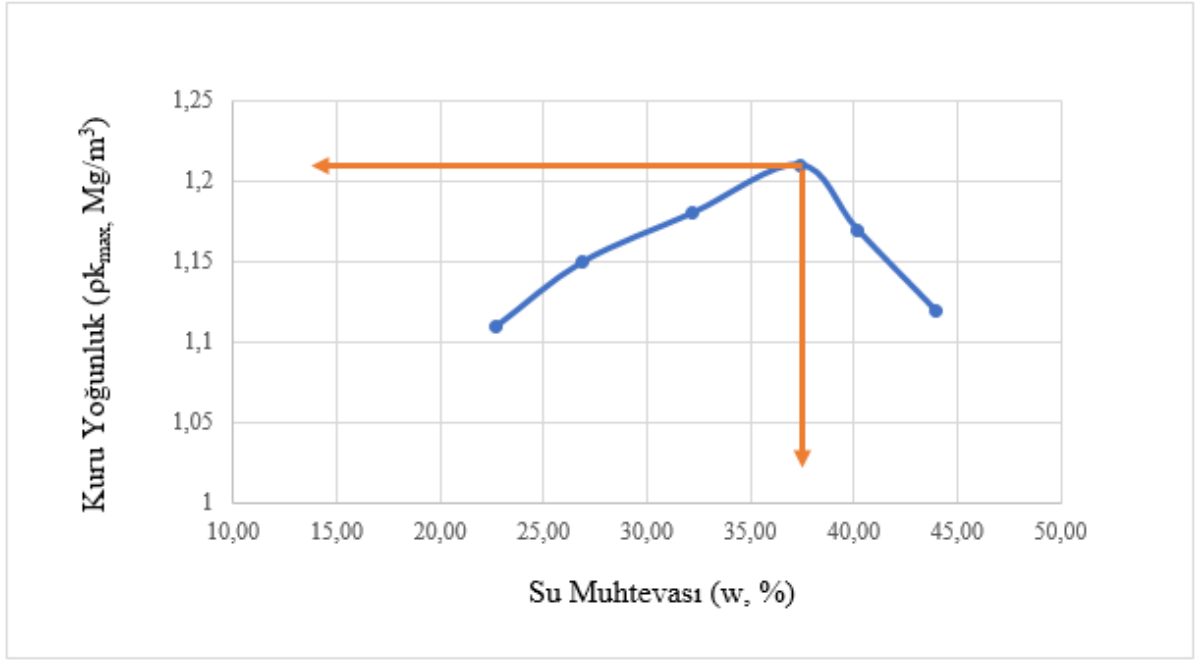
Şekil 34. ZUKİ15 numunesinin kompaksiyon eğrisi.



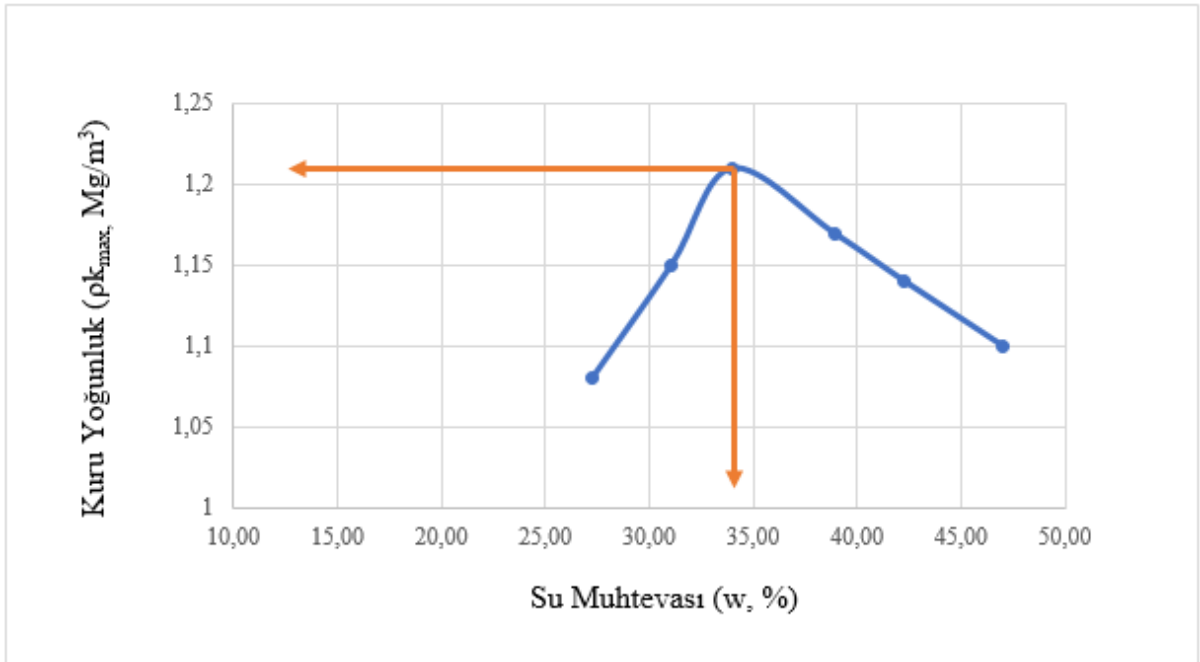
Şekil 35. ZUKİ20 numunesinin kompaksiyon eğrisi.



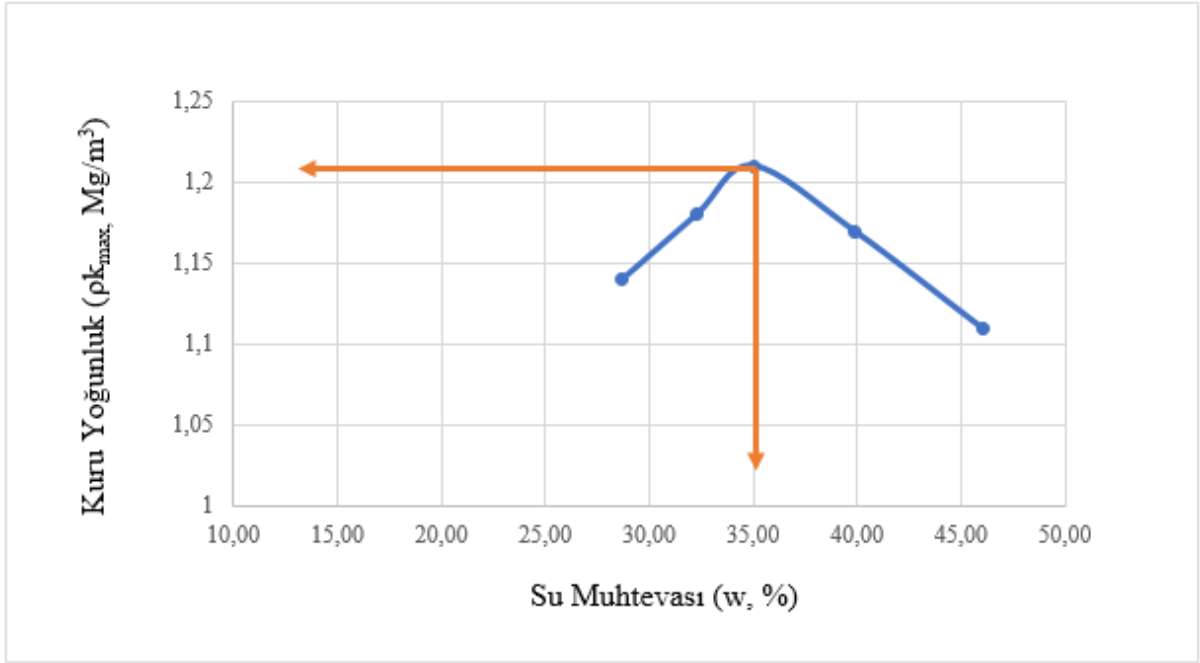
Şekil 36. ZUKİ25 numunesinin kompaksiyon eğrisi.



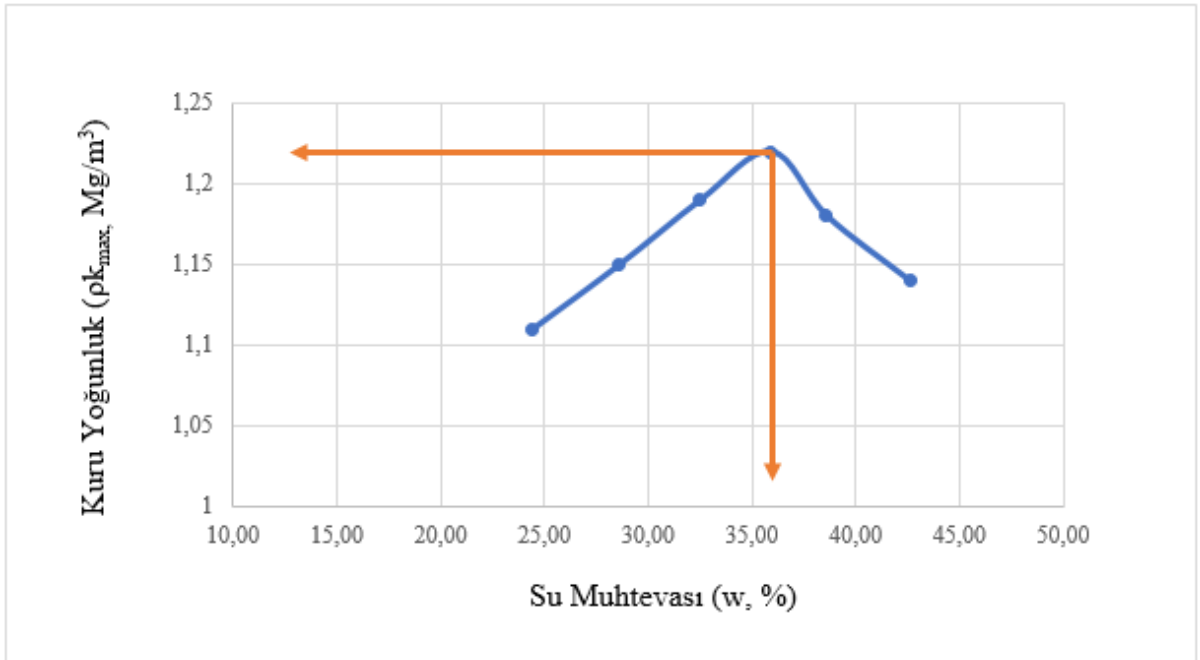
Şekil 37. ZUKİ30 numunesinin kompaksiyon eğrisi.



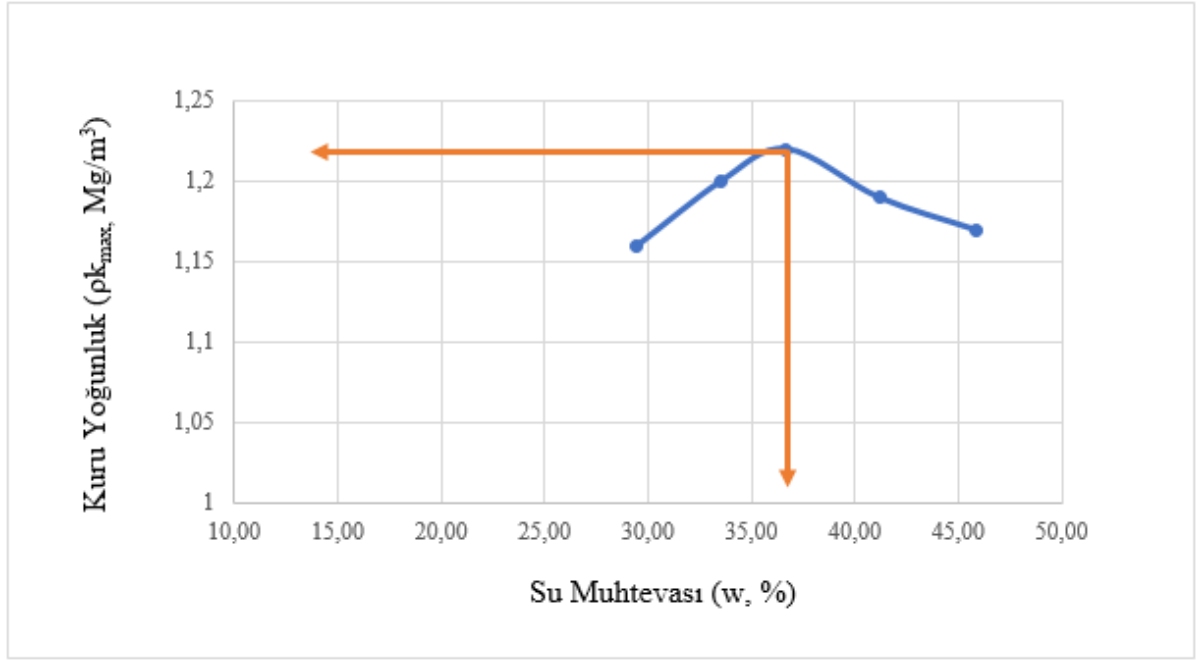
Şekil 38. ZUK5 numunesinin kompaksiyon eğrisi.



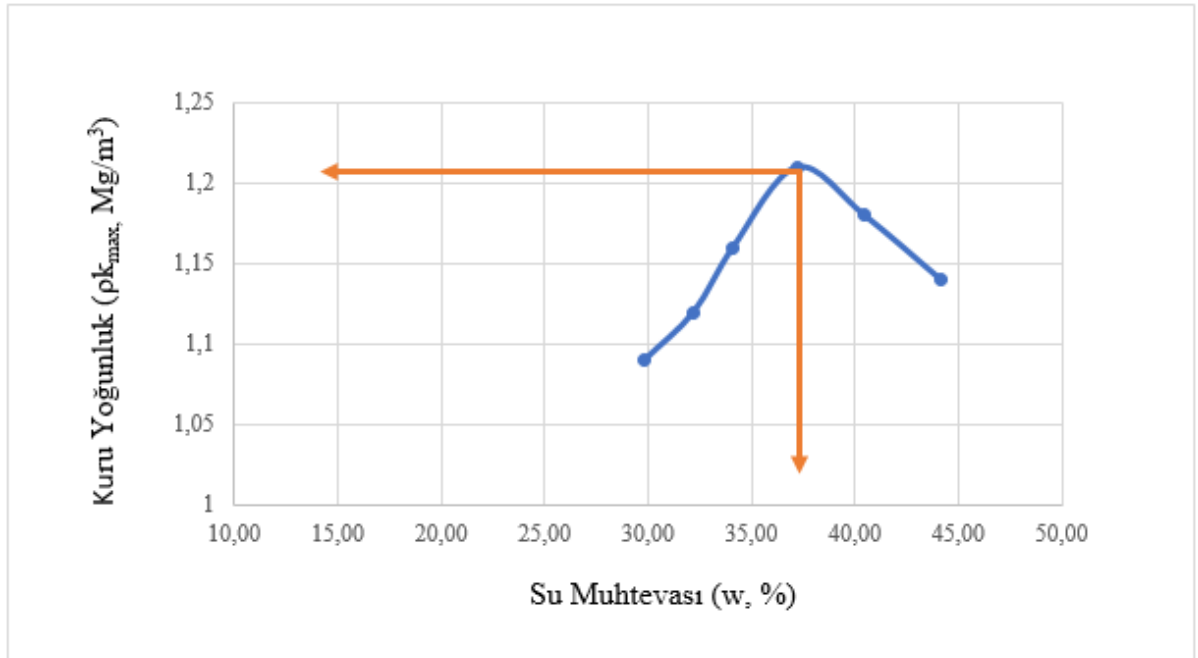
Şekil 39. ZUK10 numunesinin kompaksiyon eğrisi.



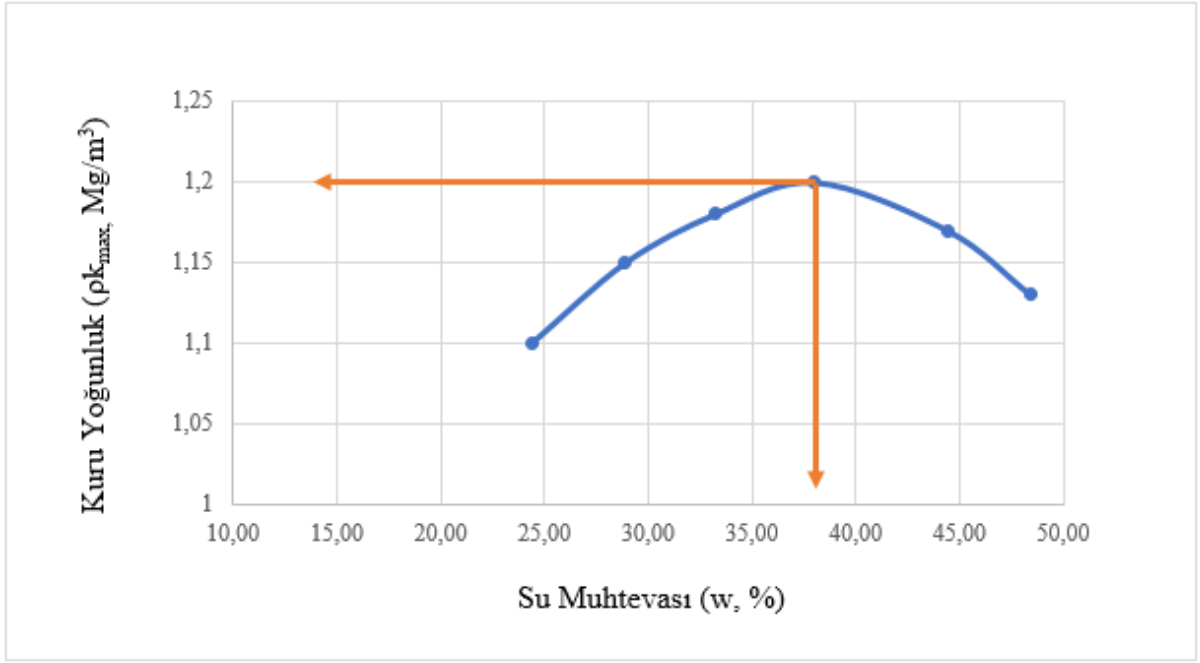
Şekil 40. ZUK15 numunesinin kompaksiyon eğrisi.



Şekil 41. ZUK20 numunesinin kompaksiyon eğrisi.



Şekil 42. ZUK25 numunesinin kompaksiyon eğrisi.



Şekil 43. ZUK30 numunesinin kompaksiyon eğrisi.

ÖZGEÇMİŞ

Emre GENÇOĞLU, yılında’ da doğdu. İlköğrenimini İlköğretim Okulunda ortaöğrenimini Lisesinde tamamladı. yılında lisans öğrenimi gördüğü Üniversitesi Mühendisliği bölümünden kaydını alarak nda öğrenimine devam etti. yılında mezun olarak olarak göreve başladı. yılında Anadolu Üniversitesi Açık öğretim Fakültesi İşletme bölümünü tamamladı. yılında kayıt yaptırdığı Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden yılında mezun oldu ve aynı yıl Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Anabilim Dalı’ nda lisansüstü öğrenimine başladı. Halen ilinde olarak görev yapan GENÇOĞLU evli ve bir çocuk babasıdır.