

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİLLERİN
STABİLİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim ÇAKILCIOĞLU

Enstitü Anabilim Dalı : YAPI EĞİTİMİ
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Seyhan FIRAT

Eylül 2007

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİLLERİN STABİLİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim ÇAKILCIOĞLU

Enstitü Anabilim Dalı : YAPI EĞİTİMİ

Bu tez 14 / 09 /2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Zeki GÜNDÜZ
Jüri Başkanı

Doç.Dr. Seyhan FIRAT
Üye

Yrd.Doç.Dr. İbrahim YÜKSEL
Üye

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında manevi desteğini gördüğüm danışman hocam Sayın Doç. Dr. Seyhan FIRAT'a teşekkür ederim.

Tez aşamamda yardımlarını esirgemeyen ve beni sürekli yönlendiren Sayın Prof. Dr. Zeki GÜNDÜZ'e teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarda ve verilerin değerlendirilmesi sırasında yardımlarını esirgemeyen Serkan KINSUN, Ahmet BAYKAL, A. Bengü SÜNBÜL ve Uğur DAĞDEVİREN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Malzeme teminindeki katkılarından dolayı Rota Madencilik A.Ş.'den Osman Nuri SOLMAZ'a, Oyak Beton'dan Semih AYDIN ve Saadettin PEHLİVAN'a, Adana Yumurtalık Sugözü Termik Santral idaresine, 2006-FBY-013 proje numaralı Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyon Başkanlığı'na maddi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük pay sahibi olan aileme ve eşime sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER TABLOSU.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
.	
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
KONU İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Giriş.....	3
2.2. Katkı Oranlarının Kıvam Limitleri Üzerine Etkisi.....	3
2.3. Katkı Oranlarının Kompaksiyon Özellikleri Üzerine Etkisi.....	4
BÖLÜM 3.	
ZEMİNLERİN KATKI MALZEMELERİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ.....	6
3.1. Giriş.....	6
3.2. Kireçle Stabilizasyon.....	7
3.3. Uçucu Küllerle İyileştirme.....	7

BÖLÜM 4.

KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ.....	10
4.1. Bentonit Kili.....	10
4.2. Uçucu Küller.....	12
4.2.1. Uçucu küllerin sınıflandırılması.....	13
4.3. Kireç.....	14
4.4. Zeolit.....	15

BÖLÜM 5.

YAPILAN DENEYLER VE UYGULANAN METOTLAR.....	19
5.1. Özgül Ağırlık.....	21
5.2. Likit ve Plastik Limit Deneyi.....	23
5.2.1. Likit limit deneyi.....	23
5.2.2. Plastik limit deneyi.....	24
5.3. Dane Çapı Dağılımı ve Zemin Sınıflandırması.....	27
5.3.1. Hidrometre deneyi.....	27
5.3.2. Elek analizi (ıslak eleme).....	30
5.3.3. Zemin sınıflandırması.....	32
5.4. Kompaksiyon Deneyi.....	34
5.5. Serbest Basınç Deneyi.....	36
5.6. Üç Eksenli UU Deneyi.....	38
5.7. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR).....	40
5.8. Kesme Kutusu Deneyi.....	42

BÖLÜM 6.

DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME.....	46
6.1. Karışımların Dane Çapı Dağılımı.....	46
6.2. Karışımların Kıvam Limitleri.....	48
6.3. Karışımların Zemin Sınıflandırmaları.....	48
6.4. Karışımların Kompaksiyon Özellikleri.....	48
6.5. Karışımların Serbest Basınç Deneyi Sonuçları.....	51
6.6. Karışımların Üç Eksenli Basınç Deney Sonuçları.....	56
6.7. Karışımların Taşıma Oranları (CBR).....	60

6.8. Karışımların Kesme Kutusu Deneyi Sonuçları.....	64
BÖLÜM 7.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	72

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

w_L	: Likit limit değeri (%)
w_p	: Plastik limit değeri(%)
I_p	: Plastisite indisi değeri(%)
w_1	: Kap ağırlığı (gr)
w_2	: Kap+ıslak numune ağırlığı (gr)
w_3	: Kap+kuru numune ağırlığı (gr)
W_1	: Piknometre ağırlığı (gr)
W_2	: Piknometre+numune ağırlığı (gr)
W_3	: Piknometre+numune+su ağırlığı (gr)
W_4	: Piknometre+ su ağırlığı (gr)
ΔH	: Düşey boy değişimi (mm)
H_0	: İlk boy (cm)
γ_k	: Kuru birim hacim ağırlığı (kN/m^3)
σ	: Gerilme (kPa)
ε	: Birim boy değiştirme ($\square H/H_0$)
ρ_w	: Suyun yoğunluğu (kN/m^3)
G_s	: Özgül ağırlık
A	: Numune kesit alanı (cm^2)
TS	: Türk standartları
TSE	: Türk standartları enstitüsü
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı
w_{opt}	: Optimum su muhtevası (%)
UU	: Konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli kesme deneyi
PL	: Plastik limit
LL	: Likit limit
I_p	: Plastisite indisi

ŞEKİLLER TABLOSU

Şekil 5.1.	Özel Tüp (a). İçi Boş Hali (b). Alt ve Üst Tarafını Mumlanmış Hali.....	21
Şekil 5.2.	Özgül Ağırlık Deney Seti 1. Piknometre 2. Desikatör 3.Vakum Pompası.....	23
Şekil 5.3.	Likit Limit Seti 1. Casagrande Aleti 2. Spatula 3. Oluk Açma Bıçağı 4. Numune Kurutma Kabı.....	24
Şekil 5.4.	Plastik Limit Deney Seti 1. Pürüzlü Cam 2. Bıçak 3. Numune Kurutma Kabı.....	27
Şekil 5.5.	Hidrometre Deney Seti 1. Sabit Sıcaklıklı Havuz 2.Mezur 3. Hidrometre 4. Derece 5. Mikser.....	28
Şekil 5.6.	Bentonit Kili Dane Dağılımı.....	30
Şekil 5.7.	Plastisite Kartı (TS 1500/2000).....	32
Şekil 5.8.	Titreşimli Kompaksiyon Deney Seti 1. Hitli 2. Kompaksiyon Kalıbı 3. Titreşimli Tokmak.....	34
Şekil 5.9.	Üç Eksenli Deney Seti.....	36
Şekil 5.10.	Üçeksenli Deney Hücresi	40
Şekil 5.11.	CBR Deneyi.....	40
Şekil 5.12.	Kesme Kutusu Deney Aleti.....	42
Şekil 6.1.	Hidrometre Dane Çapı Dağılım Grafiği.....	47
Şekil 6.2.	Kuru Elek Analizi Grafiği.....	47
Şekil 6.3.	Likit Limit, Plastik Limit ve Plastisite İndisi İlişki Grafiği.....	48
Şekil 6.4.	Karışımların Optimum Su Muhtevası Grafiği.....	49
Şekil 6.5.	Karışımların Kuru Birim Hacim Ağırlık Grafiği.....	50
Şekil 6.6.	Serbest Basınç Deneyi Günlük, 7 Günlük ve 28 Günlük Kür Deney Grafiği.....	52

Şekil 6.7.	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli Serbest Basınç Deneyi Grafiği.....	53
Şekil 6.8.	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli Serbest Basınç Deneyi Grafiği.....	53
Şekil 6.9.	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli Serbest Basınç Deneyi Grafiği.....	54
Şekil 6.10.	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli Serbest Basınç Deneyi Grafiği.....	54
Şekil 6.11.	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli Serbest Basınç Deneyi Grafiği.....	55
Şekil 6.12.	3 Eksenli Hücre Basma Deneyi Günlük, 7 Günlük ve 28 Günlük Kür Deney Sonuçları.....	57
Şekil 6.13.	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli 3 Eksenli Hücre Basma Deneyi Grafiği.....	58
Şekil 6.14.	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli 3 Eksenli Hücre Basma Deneyi Grafiği.....	58
Şekil 6.15.	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli 3 Eksenli Hücre Basma Deneyi Grafiği	59
Şekil 6.16	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli 3 Eksenli Hücre Basma Deneyi Grafiği.....	59
Şekil 6.17.	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli 3 Eksenli Hücre Basma Deneyi Grafiği.....	60
Şekil 6.18.	Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi Grafiği.....	61
Şekil 6.19.	6.19 %100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli CBR Deneyi Grafiği.....	62
Şekil 6.20.	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli CBR Deneyi Grafiği.....	62
Şekil 6.21.	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli CBR Deneyi Grafiği.....	63
Şekil 6.22.	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli CBR Deneyi Grafiği.....	63
Şekil 6.23.	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli CBR Deneyi Grafiği.....	64

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Türkiye Uçucu Küllerine Ait Kompaksiyon Deney Sonuçları.....	4
Tablo 4.1.	Bentonit Kilinin Kimyasal Özellikleri.....	10
Tablo 4.2.	Bentonit Kilinin Geoteknik Özellikleri.....	11
Tablo 4.3.	Adana Yumurtalık Sugözü Termik Santralının Analiz Raporu	14
Tablo 4.4.	Kalsiyum kirecinin bileşimi (TS EN 459-1).....	15
Tablo 4.5.	Kullanılan Zeolitin Kimyasal Analiz Sonucu.....	16
Tablo 4.6.	Kullanılan Zeolitin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	17
Tablo 5.1.	Kullanılan Katkı Oranları.....	20
Tablo 5.2.	Karışımların Özgül Ağırlıkları.....	22
Tablo 5.3.	Karışımların kıvam limitleri ve plastisite indisleri.....	26
Tablo 5.4.	Hidrometre deney sonuçları.....	29
Tablo 5.5.	Islak eleme deney sonuçları.....	31
Tablo 5.6.	Karışımların zemin sınıfları.....	33
Tablo 5.7.	Karışımların optimum su muhtevası ve kuru birim ağırlıkları.....	35
Tablo 5.8.	Karışımların serbest basınç deneyi sonucu kayma dayanımları....	37
Tablo 5.9.	Karışımların Üçeksenli Deney, Maksimum Kayma Dayanımları (c) değerleri.....	39
Tablo 5.10.	Karışımların Kuru Maksimum CBR değerleri.....	41
Tablo 5.11.	Kesme Kutusu Deneyi Günlük Yapılan Deneylerin Sonuçları.....	43
Tablo 5.12.	Kesme Kutusu Deneyi 7 Günlük Kürde Bekletilen Deneylerin Sonuçları.....	44
Tablo 5.13.	Kesme Kutusu Deneyi 28 Günlük Kürde Bekletilen Deneylerin Sonuçları.....	45

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Stabilizasyon, Bentonit, Kireç, Zeolit, Uçucu Kül

İnşaat sahasında karşılaşılan zeminlerin her zaman istenilen özelliklere sahip olmadığı durumlarda geoteknik mühendisi, arazide zemin özelliklerinin getirdiği sınırlamaları olduğu gibi kabul etmek veya tasarım kriterlerini sağlayacak şekilde bu özellikleri iyileştirmek durumundadır. Zayıf dayanım özelliklerine sahip zemin yapısının mekanik, fiziksel ve kimyasal iyileştirme yöntemleri ile dış kuvvetlere dayanıklı hale getirilmesine zemin stabilizasyonu (iyileştirmesi) denir. Zemin stabilizasyonu, mekanik araçlarla zeminin boşluk oranının azaltılması, zemin ortamdaki suyun uzaklaştırılması ve zemine donatılar yerleştirilmesi işlemlerinden oluşur.

Bu çalışmada bentonit kiline %10 kireç, %5-10-15-20-25 oranlarında uçucu kül ve zeolit ilave edilerek yapılmıştır. Numuneler homojen olarak karıştırıldıktan sonra özgül ağırlık, kıvam limitleri, hidrometre, kuru elek ve kompaksiyon deneyleri uygulanmıştır. Kompaksiyon deneyinden bulduğumuz optimum su muhtevası oranında tekrar numuneler hazırlanıp gününde, 7 günlük ve 28 günlük kürde bırakılmıştır.

Bentonit kiline ilave edilen her katkının mukavemeti arttırdığı gözlemlenmiştir. Kürde bekletilen numunelerde en yüksek mukavemeti %100 Kil + %10 Kireç + %5 Zeolit + %5 Uçucu Kül göstermiştir. CH sınıfı killi zeminlerde kireç, zeolit ve uçucu külün stabilizasyonda alternatif çözüm olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

STABILIZATION OF HIGH PLASTICITY CLAYS

SUMMARY

Key words: Stabilization, Bentonite, Lime, Zeolite, Fly Ash.

The characteristics of the construction area soils sometimes have the inconvenient properties. In this condition, the engineer's mission is to improve the soil properties of this area by accepting the existing soil property limiting or making stabilization on the soils of the ground according to the design criteria.

Weak strength characteristic of soil are improved to strong strength properties by using mechanical, physical and chemical stabilization methods. This formation is called soil improvement. Soil improvement contains decreasing the void ratio of the ground by using mechanic tools, drainage the water from the soil structure and locating the steel equipments on the ground for stabilization.

In this study bentonite clay is mixed with the ratio of %10 percent lime, %5-10-15-20-25 percent fly ash and zeolite. Atterberg limits, specific gravity, hydrometer, dry sieve analysis and compaction experiments are applied on the homogenous samples. The new samples prepared with the optimum water content calculated from the compaction experiment are leaved for 1, 7 and 28 daily cure period.

The adulterated materials added into bentonite increased the strength of these samples. The maximum strength value estimated from the %100 clay+%10 lime +%5 zeolite +%5 fly ash samples. Based on the findings of this research, it is concluded that lime, zeolite and fly ash can be used as an alternative solution in soil improvement of the CH clay.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Stabilizasyon zayıf dayanım özelliklerine sahip zemin yapısının mekanik, fiziksel ve kimyasal iyileştirme yöntemleri ile dış kuvvetlere dayanıklı hale getirilmesidir. Yer, yapıların oturtulduğu düzlemdir ve inşaat yatırımı sağlam bir zemin üzerine yapılmak istenir. Zaman içinde, güvenli inşaat yapılabilecek sağlam yerler azalmış ve/veya her tür özelliğe sahip zemin üzerine inşaat yapma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu sebeplerden zeminlerin iyileştirilmesi (stabilizasyon) geoteknik biliminin ilgilendiği geniş kapsamlı bir konudur [1].

Zemin, yapıların üzerine yapıldığı, bu şekilde yapı yükünü taşıyan, danelerden oluşan bir yığındır. Daneler birbiri üzerinde kendi ağırlığı, hareketli yükler, sabit yükler ve yer çekimi etkisi ile durur. Bu danelerden oluşan zemin iskeleti, danelerin şekline ve büyüklüklerine bağlı olan sürtünme dayanımı ile mekanik kuvvetlere direnç gösterir. Bu direnç mukavemeti gelen yükleri taşıyamadığında çeşitli yöntemlerle zemine iyileştirme yani stabilizasyon yapılması gerekir.

Enerji talebinin gittikçe artması, petrol kaynaklarının azalması ve nükleer santrallere karşı kamuoyu tepkisinden dolayı enerji üretiminde kömürün kullanılması kaçınılmazdır. Bu durum, üretilecek çok büyük miktarlardaki uçucu külün uygun bir şekilde depolanmasını ve yapı endüstrisinde kullanılmasını zorunlu kılacaktır.

Türkiye Ege Bölgesinde doğal zeolit oluşumları bilinmektedir. Ülkemizde zengin doğal zeolit yataklarının varlığı bilinmesine rağmen henüz yaygın bir şekilde kullanım alanı bulunamamıştır.

Doğal zeminle farklı santrallerden değişik oranlarla katılan uçucu kül karışımının geoteknik özellikleri ayrıntılı bir literatür çalışması olarak ikinci bölümde verilmiştir.

Üçüncü bölümde, zeminlerin katkı malzemesi (uçucu kül, kireç ve zeolit) ile iyileştirme yöntemlerine değinilmiştir.

Dördüncü bölümde, kullanılan malzemeler ve fiziksel, kimyasal özellikleri verilmiştir.

Beşinci bölümde, yapılan deney metotları açıklanmıştır. Deney numunelerinin hazırlanması ve deneylerin yapılışı ele alınmıştır.

Altıncı bölümde, yapılan deney sonuçları ve değerlendirilmeleri verilmiştir. Bu bölümde zemin ve katkılı malzemelerin özgül ağırlıkları, likit ve plastik limit, dane çapı dağılımı ve zemin sınıflandırması, kompaksiyon gibi özelliklerin incelenmesinde günlük, 7 günlük ve 28 günlük kür süreleri dikkate alınarak serbest basınç deneyi, üç eksenli (UU) deneyi, Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve kesme kutusu deneyleri dikkate alınmıştır.

Yedinci bölümde çalışmadan elde edilen sonuç ve öneriler sunulmuştur.

Günümüz geoteknik mühendisliğinde stabilizasyon malzemesi olarak kullanılan kireç, uçucu kül ve zeolitin faydaları incelenmiştir. Bentonit kili ile kireç, zeolit ve uçucu kül karıştırılarak zeminin geoteknik özellikleri belirlenmiştir.

BÖLÜM 2 . KONU İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu çalışmada yapılmış olan Zemin + Kireç + Zeolit + Uçucu Kül (F tipi ve C tipi) karışımlarına ait deneyleri daha önceki yapılmış olan çalışmalar ile karşılaştırmak ve konu hakkında ön bilgi almak amacıyla literatür çalışmasında elde edilen veriler deneysel çalışma sırasıyla özetlenmeye çalışılmıştır.

2.2. Katkı Oranlarının Kıvam Limitleri Üzerine Etkisi

Çalışmada kür süresinin etkisini incelemek için kıvam limiti değerlerini kürsüz, bir hafta ve bir ay kür sürelerinde deneyler uygulanmıştır. Sonuç olarak kürde bekletilen numunelere uygulanan kıvam limitleri değeri hemen yapılan likit limit değerinin altında olduğu ve plastik limit değerlerinin aynı olduğu hesaplanmıştır [2].

Doğal zeminin kıvam limitleri ve dane birim hacim ağırlığı değerlerinin uçucu kül ve (uçucu kül + kireç) katkısı ile nasıl değiştiği belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda uçucu kül oranı arttırıldıkça plastik limit değerlerinin arttığı, plastisite indisinin ve dane birim hacim ağırlığının düştüğü görülmüştür [3].

Diğer bir çalışmada uçucu kül katkısının artışı ile likit limitte bir artma, plastik limitte ise bir azalma gözlemlenmiştir. Uçucu kül katkı oranının %35 olduğu durumda artık karışım non-plastik durum elde edilmiştir [4].

Doğal zemine ait kıvam limitlerinin farklı oranlarda Soma uçucu külü katkısı ve kür süresi ile değişimi belirlemeye çalışılmış ve yapılmış deneyler sonucunda kürlü numunelerin likit limit değerlerinin düştüğünü, plastik limit ve plastisite indisinin

arttığı gözlemlenmiştir [5].

Yapılmış bir diğer çalışmada farklı uçucu külleri farklı oranlarda aynı zemin ile karıştırarak kürsüz ve beş gün kür ile kıvam limitlerini belirlemiştir. Kür sonunda likit limitte bir azalma ve plastik limitte bir artma gözlemlenmiştir [6].

Yapılan bir başka çalışmada doğal zemine %5 kireç sabit tutularak %5,10,15 oranlarında F tipi uçucu kül ilave edilip likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Katkı oranlarının artması ile plastisite indisin düştüğü belirlenmiştir. Yapılan deneylere göre katkı oranları artışı ile likit limit değerleri %10 uçucu küle kadar artmıştır. Plastik limit değerleri %15 uçucu küle kadar artmıştır. Bu artış katkı oranları ve dane çapı artışına paralel olmuştur. Likit limit değeri %10 uçucu küle en büyük değerine ulaşmış, %15 uçucu kül karışımında azalmıştır [1].

2. 3. Katkı Oranlarının Kompaksiyon Özellikleri Üzerine Etkisi

Wasti yapmış olduğu Uçucu Küllerin Geoteknik Uygulamalarda Kullanımı adlı çalışmasında Türkiye uçucu küllerine ait kompaksiyon deney sonuçlarını Tablo 2.1’de özetlemiştir [7].

Tablo 2.1. Türkiye Uçucu Küllerine Ait Kompaksiyon Deney Sonuçları

Uçucu Kül	$w_{opt}(\%)$	$\gamma_{maks} (kN/m^3)$
F Tipi	25.5	13.40
C Tipi	20.0	15.20
Çatalağzı (F)	30.4	10.70
Soma-B (C)	24.4	13.25

Tayland’ da üretilen C sınıfı Mae Moh uçucu külü ile standart proktor deneyleri ile uçucu külün puzolanik özelliklerinin boşluk oranını ve kompaksiyon özelliklerini doğrudan etkilediği belirlenmiştir [8].

Zemin sınıfının ML (İnorganik silt ve çok ince kumlar, kaya tozu çok az plastik siltli veya killi ince kumlar) olarak belirlenmiş zemin ile belirli oranlarda uçucu kül karıştırılmış zemin üzerindeki kompaksiyon deney sonuçlarına göre kuru birim hacim ağırlıklarında en yüksek değeri %5 uçucu kül katkılı numune göstermiştir. Artan katkı malzemelerinde de giderek azaldığı görülmüştür. Optimum su muhtevası olarak da artan uçucu kül oranında artış gözlenmiştir. En yüksek değer %25 uçucu kül olmuştur [2].

Zemin sınıfının CH (Yüksek plastisiteli inorganik killer, yağlı killer) olan kil ve Seyitömer Termik Santrali uçucu külü kullanarak yapılmış olan kompaksiyon deneyi sonuçlarında uçucu kül oranı arttıkça kuru birim hacim ağırlığında azalma, optimum su muhtevasında ise artma görülmüştür [9].

Zemin sınıfı CH olan Eymir Gölü kili ile Soma ve Çatalağzı Termik Santrali uçucu külleri kullanılarak yapılan standart ve modifiye proktor deneylerde uçucu kül oranı arttıkça kuru birim hacim ağırlıklarının düştüğü optimum su muhtevasının arttığı görülmüştür [5].

Zemin sınıfı CI olan Bilecik yöresine ait kaolin kiline Bursa-Orhaneli uçucu külü kullanılarak yapılan standart deneyler sonunda optimum su muhtevasında azalma, kuru birim hacim ağırlığında artış görülmüştür [1].

Daha önceki yapılan çalışmalarda kıvam limitlerinde, uçucu kül oranını arttırdıkça likit limitin düştüğü plastik limitte ve plastisite indisinde artma gözlenmiştir. Kompaksiyon deneyinde de uçucu kül oranı arttıkça optimum su muhtevasının arttığı kuru birim hacim ağırlığının da düştüğü görülmüştür.

BÖLÜM 3. ZEMİNLERİN KATKI MALZEMELERİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

3.1. Giriş

Zeminlerin katkı maddeleri ile iyileştirilmesi işleminde zeminlerin mekanik özelliklerinde çevre ve yükleme koşullarına göre gerekli değişikliklerin sağlanması güvenli, ucuz ve doğal bir malzeme gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır [10]. Katkı maddeleri ile iyileştirme işlemleri ulaşım, su yapıları, yapı temel inşaatları, katı atık depolama tesislerinde uygulanmaktadır [11]. Çimento, kireç, uçucu kül, bitüm, klorit, lignin, melas ve özel kimyasal bileşikler katkı maddesi olarak sayılabilir [12,13].

Stabilizasyon işleminin değerlendirilmesinde fiziksel, mekanik tekniklerin yanı sıra kimyasal etkilerin de göz önünde tutulmasıdır [10]. Genel olarak kimyasal işlemler tek yönlüdür. Reaksiyon tamamlandıktan sonra katılan zemin niteliklerini kolayca kaybetmez [14, 15].

İyileştirmeyi karakterize eden değişiklikler plastisite indisinin düşmesi, geçirgenliğin azalması, içsel sürtünme açısı ve kohezyonun artması ile oluşan dayanım artışı olmaktadır.

Düşük, katkı miktarlarıyla yapılan, karışımlarda plastik limitin, yükselmesi genel görünümdür. Bu durum zemin daneleri arasındaki bağların kuvvetlendirildiği şeklinde açıklanmaktadır [3]. Kireç katkısının likit limit değerinde, zeminin özelliklerine göre artma veya azalma oluşturduğu görülmüştür [10]. Burada belirleyici olan zemin özellikleri, cins ve miktar bakımından öz katyonların durumu ve katyon değişim kapasitesidir. Uçucu kül katkısı ise, plastisite indisini düşürücü etki yaparak, zeminin özelliklerine bağlı olarak işlenebilirliği kolaylaştırmaktadır [16]. Katkı maddeleri ile stabilizasyon; stabilizasyonun etkinliği yanında, kolayca

bulunabilmesi, arazi uygulama kolaylığı ve ekonomik olarak üretimin yapılabilmesi gibi pek çok faktörün birleşmesi ile oluşan güçlüklerin aşılması ile uygulanabilir

3.2 Kireçle Stabilizasyon

Kireç bilinen en eski stabilizasyon malzemesidir. Kil içeren zeminlerin önemli bir bölümü % 3-8 arası sönmüş kireç eklenmesiyle iyileşmektedir. Kireç kil mineralindeki silisle reaksiyona girer. Oluşan jel kil danelerini çevreleyip boşlukları tıkar.

Kireçle stabilizasyonda en zararlı etken zeminde bulunabilecek organik malzemedir. Organik madde ve sülfat iyonunun varlığı önceleri stabilizasyonun olumsuz etkilendiğini belli etmemekte, ancak daha sonra kuruma ıslanma olduğunda zemin ufalanmaktadır. Zeminle karıştırıldığında kirecin ilk etkisi plastisiteyi düşürmektir. Ortamın pH'ı azaldığından zemin yapısı floklaşmakta, böylece ağır killerin işlenmesi kolaylaşmaktadır [11, 17, 18, 19].

Kireçle stabilizasyonun başarısını artıran en önemli unsur zeminde amorf durumda bulunan silikat miktarı ve aluminat içeriğidir. Büyük projelerde zeminin hangi yüzdede kirece gereksinimi olduğunu saptamak için en uygun yolun laboratuvar çalışması ile 7-14 -28 gün bekletme (kür) süresi dikkate alınarak, kireç katkı optimum değeri bulunmalıdır.

3.3. Uçucu Küllerle İyileştirme

Bu çalışma kapsamında dolguda kullanılması düşünülen kil zeminlerin uçucu kül ile iyileştirilmesi ve oluşan puzolonik reaksiyon incelenmiştir.

ASTM C618, puzolanların kimyasal bileşiminde $[(SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3) \geq 0.70]$ olmasını öngörmektedir. Büyük oranda amorf olan bu oksitlerin toplam miktarına bir alt sınır getirilmesindeki düşünce normal sıcaklıkta $(Ca(OH)_2)$ ile kolayca kimyasal

tepkimeye girerek bağlayıcı bir yapı oluşturabilmeleridir.

Uçucu küller, kendi başlarına bağlayıcı özelliği olmayan ancak sulu ortamda kireçle birleştiklerinde bağlayıcı özellik kazanan puzolanik malzemelerdir. Kireç ve su ile karıştırıldıktan sonra artan süre ile birlikte uçucu küllerin puzolanik özellikleri nedeniyle uçucu kül katkılı zemin belirli bir süre sonunda dayanım kazanır. Uçucu küllerde puzolanik özelliğin esas olan bu dayanım kazanma özelliği oldukça yavaş olarak ortaya çıkar. Artan süreyle birlikte uçucu küllerin puzolanik özellikleri artar. Ayrıca CaO miktarı yüksek uçucu küller daha iyi puzolanik özellik göstermektedir [20].

Uçucu küldenki puzolanik etki külün bileşimine ve inceliğine bağlı olarak değişmektedir. Puzolanik özelliği etkileyen faktörleri şöyle sıralayabiliriz:.

1. Uçucu kül içerisindeki SiO_2 ve Al_2O_3 miktarının artması ve bu bileşiklerin amorf yapıda olması puzolanik etkiyi artırır.
2. Kül içinde bulunan CaO , SO_3 ve alkali oksitlerin, puzolanik özelliği ne şekilde etkilediği tam olarak bilinmemektedir.
3. Külde yanmamış karbon (kömür) miktarının artması puzolanik özelliğin azalmasına yol açar.
4. Uçucu küldenki karbon boşluklu bir yapıya sahiptir. Dayanımı düşüktür ve su ihtiyacını artırır.

Uçucu küllerin puzolanik özelliği ve mekanik dayanım incelikle birlikte artmaktadır [21].

Uçucu külün puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği, uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri tarafından belirlenir. Oluşan değişiklikler sadece uçucu külün meydana geldiği mineral malzemenin değişen miktarından değil, kömürün yakıldığı kazanın çalışma durumundan, kömürün yanmadan önceki öğütülme inceliğinden ve çevre kirliliği kontrolü için kömürle karıştırılan katta maddelerinden de meydana gelir. Küldenki bu değişiklik puzolanik aktivite tayinini ve standart puzolanik aktivite testlerinin yapılmasını engeller.

Puzolonik aktivite ilave birçok linyit uçucu külleri kendi kendine sertleşme özelliğine de sahiptir. Bu küller su ile karıştırılıp kompaksiyona tabi tutulduklarında çimentolaşmadan dolayı sertleşirler. Genel olarak bu etki, küldeki serbest kirecin ve su ile çözünebilen elemanların varlığı ile ilgilidir [6].

BÖLÜM 4. KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada kullanılan bentonit kilinin ve katkı malzemelerinin (Uçucu kül, Kireç ve Zeolit) özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

4.1. Bentonit Kili

Çalışmada kullanılan bentonit kili Ankara karayolu üzerinde bulunan Kaytan Bentonit Şirketi tarafından temin edilmiştir.

Tablo 4.1. Bentonit Kilinin Kimyasal Özellikleri

Si O ₂	%55-63
Al ₂ O ₃	%16-23
Fe ₂ O ₃	% 3 Max.
Na ₂ O	% 2 Min. (Doğal Na içerikli olacaktır).
CaO	% 2 max
MgO	% 2 max
K ₂ O	% 1.25 max

Bentonit kilin geoteknik özellikleri Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarında belirlenmiştir. Uygulanan deneyler sırasıyla özgül ağırlık, hidrometre, yıkamalı-kuru elek, kompaksiyon, taşıma oranı (CBR), Serbest Basma ve Üç Eksenli Hücre Basma (UU) deneyi yapılmıştır.

Tablo 4.2 Bentonit Kilinin Geoteknik Özellikleri

Geoteknik özellikler	Deney Sonuçları
Kum (%)	----
Silt (%)	16.81
Kil (%)	81.00
Likit limit (LL) (%)	66
Plastik limit (PL) (%)	19
Plastisite indisi (Ip) (%)	47
Özgül ağırlık (Gs)	2.99
Zemin sınıfı TS 1500	CH
Optimum su muhtevası (w_{opt}) (%)	55.00
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_k) (kN/m ³)	9.80
Üç eksenli deneyi kayma dayanımı c (Günlük UU) (kPa)	47.00
Üç eksenli deneyi kayma dayanımı c (7 Gün kürlü UU) (kPa)	66.00
Üç eksenli deneyi kayma dayanımı c (28 Gün kürlü UU) (kPa)	80.00
Serbest basınç deneyi kayma dayanımı q_u (Günlük) (kPa)	28.00
Serbest basınç deneyi kayma dayanımı q_u (7 Gün kürlü) (kPa)	35.00
Serbest basınç deneyi kayma dayanımı q_u (28 Gün kürlü) (kPa)	51.00
Maksimum kuru CBR (%) Günlük	15.00
Maksimum kuru CBR (%) 7 Gün Kürlü	40.00
Maksimum kuru CBR (%) 28 Gün Kürlü	60.00
Aktivite (Ip/kil%)	0.58

4.2. Uçucu Küller

Son yıllarda, değişik alanlardan birçok mühendis, endüstriyel atıklardan kaynaklanan çevre problemlerinin çözümü ve bu atıkların uygun bir şekilde farklı mühendislik uygulamalarında kullanım olanaklarını araştırmaya yönelmiştir. Bu çalışmalar, atık maddelerin kimyasal ve fiziksel yapılarını, mühendislik özelliklerini belirleme ve özellikle inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanım alanlarını belirleme konusunda yoğunlaşmıştır.

Kömürün, termik santralde yakılmasıyla elde edilen diğer bir yan ürün ise uçucu küllerdir. Oluşan baca gazları ile birlikte, baca çekişinin etkisi altında yukarıya doğru yükselen çok ince daneler, bacanın üst kısmında elektrofiltre veya siklon denilen toz tutucularda, elektrostatik ve mekanik yöntemlerle tutulurlar. Baca gazları ile sürüklenen ve hava ile temas ederek ani soğuma sonucu puzolanik özellik kazanan bu küllere uçucu kül denir. Bu küller daha sonra toz tutucuların alt kısmında bulunan bankerlerde biriktirilir ve periyodik olarak santral dışına alınırlar. Genelde küresel bir yapıya sahip olan uçucu küllerin çapları 1~300 mikron mertebesindedir [22] .

Termik santral katı atıkları, kömür damarlarındaki çatlaklarda bulunan kaya birikintilerinden dolayı meydana gelmektedir. Bunların miktarı ise kömürün cinsine bağlı olarak ağırlığın %8~15' i arasında değişir. Kömürdeki bu kaya birikintilerinin miktarı kömürden kömüre değiştiği için küller arasında da farklılıklar beklenir. Uçucu küller çok kompleks bir yapıya sahip malzemelerdir. Bileşiminde değişik oranlarda quartz (SiO_2), mallit ($2\text{SiO}_2.3\text{Al}_2\text{O}_3$), magnetit (Fe_3O_4), kireç (CaO), anhidrit (CaSO_4), ve jips ($\text{CaSO}_4.2\text{H}_2\text{O}$) bulunmaktadır. Bu bileşiklerden mallit ($2\text{SiO}_2.3\text{Al}_2\text{O}_3$) ise uçucu küle puzolanik özellik verir [23].

TSE 1968'de uçucu külün çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılmasına ilişkin standart yayınlamıştır [24].

4.2.1. Uçucu küllerin sınıflandırılması

Bir termik santralde yakıt olarak genellikle taşkömürü veya linyit kömürü kullanılır. Uçucu küllerin yapısı kömürün kaynağına bağlı olarak değişiklik gösterir. Uçucu küller yakılan kömür cinsine göre iki grupta sınıflandırılır:

4.2.1.1. F-tipi uçucu küller

Genellikle antrasit ve taşkömürünün yakılmasıyla elde edilirler. Antrasit termik santrallerde kullanılmadığı için bütün F-tipi uçucu küller taşkömüründen üretilmektedir. Uçucu küllerin kireç içeriği kalsiyum oksitle (CaO) gösterilir. F-tipi uçucu küller %10'dan daha az CaO içerdikleri için düşük kireç külü olarak da isimlendirilirler. Ayrıca bu küllerin yapılarında serbest kireç bulunmaz. Bu tip uçucu küller kendi kendine sertleşme özelliğine sahip olmayıp genellikle çimentolaşma özelliği gösterirler. Yani uçucu kül daneleri sulu ortamda kalsiyum hidroksitle (kireçle) reaksiyona girerek çimentolaşmış ürünler meydana getirirler. Bu şekilde oluşan çimentolaşmış ürünler, kimyasal olarak hidrate olmuş portland çimentosuna çok benzerdir. Puzolanik reaksiyonlar, normal atmosfer sıcaklığında çok yavaş oluşur.

4.2.1.2. C-tipi uçucu küller

Linyit kömürlerinin yakılmasıyla meydana gelirler ve %20'den daha fazla kalsiyum oksite sahip olduklarından yüksek kireç külü olarak adlandırılırlar. Yapılarında, oranı %1~3 arasında değişen serbest kireç bulunur. Bunlar çimentolaşma özelliğine sahip oldukları gibi kendi kendilerine de sertleşebilirler. Bir başka deyişle, su ile karıştırıldıklarında aynı portland çimentosunun hidrasyonla sertleşmesi gibi sertleşirler. Birçok durumda bu ilk sertleşme nispeten hızlı olur. Çimentolaşma derecesi uçucu külün kalsiyum oksit (CaO) içeriğine bağlı olarak değişir. Kalsiyum oksit oranının fazla olması çimentolaşmanın da fazla olacağını gösterir [3].

Çalışmada kullanılan uçucu kül Adana Yumurtalık Sugözü Termik Santralinden temin edilmiştir. Firmanın 20.07.2006 tarihinde Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği onaylı Kalite Kontrol Bağımsız Deney Laboratuvarı sonucu Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Adana Yumurtalık Sugözü Termik Santralının Analiz Raporu

Özellik	Uçucu Kül Numunesi	TS EN 450 Limit Değer
% Kızdırma Kaybı	2.15	En fazla 5.0
% Cl	0.0035	En fazla 0.1
% SO ₃	0.23	En fazla 3.0
% Serbest CaO	0.04	En fazla 1.0
% Reaktif SiO ₂	46.63	En fazla 25.0
Özgül Ağırlık, g/cm ³	2.34	-
% 45 µm Elek Bakiyesi	15.20	En fazla 40.0
% 28 Günlük Aktivite Endeksi	75.50	En fazla 75.0
% 90 Günlük Aktivite Endeksi	-	En fazla 85.0

4.3. Kireç

Kireç, su ile karıştırıldığında, başlangıçta plastik sonra gittikçe taş halinde sertleşen anorganik bir bileşiktir. Kirecin hammaddesi kalker (CaCO₃) ve dolomittir (CaCO₃ + MgCO₃). Kireç üretimine etki eden faktörler çeşitli olup başlıcaları şunlardır:

1. Üretimde kullanılan kalker ve dolomitin saflık derecesi.
2. Üretimde kullanılan yakıt çeşidi.
3. Üretimde kullanılan kalker ve dolomitin boyutu.
4. Üretimde kullanılan fırın çeşididir.

Katkı maddeleri ile stabilizasyon; stabilizasyonun etkinliği yanında kolayca bulunabilmesi, arazi uygulama kolaylığı ve ekonomik olarak üretim yapılabilmesi gibi pek çok faktörün birleşmesiyle oluşan güçlüklerin aşılması ile uygulanabilir.

Katkı maddeleri zemine laboratuvarında çok yararlı görünürken arazi uygulamasında etkin karıştırma güçlükleri, yağmur, sıcak gibi çevre koşulları nedeniyle bu olumlu durumu yitirebilirler [11]. Türk Standardına göre (TS EN 459-1) bileşimini teşkil eden maddeler Tablo 4.4’de görülmektedir [25].

Tablo 4.4. Kalsiyum kirecinin bileşimi (TS EN 459-1)

Bileşimi teşkil eden maddeler	Kalsiyum kireci (söndürülmüş) S-KK 80 (ağırlıkça %)
CaO,	en az 80
MgO,	≤ 5
CO ₂ ,	en çok 7
Asitte çözünmeyen maddeler, SiO ₂ dahil,	en çok 1,5
Metal oksitler: Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , TiO ₂ , SiO ₂ dahil,	en çok 1
SO ₃ dahil,	en çok 2

4.4. Zeolit

Yirminci yüzyıl teknolojinin giderek artan hammadde gereksiniminin en çok yansıdığı alan endüstriyel hammaddeler olmuştur. Bunlar içinde ise yoğun araştırmaların yapıldığı ve en çok zincirleme buluşların birbirini izlediği hammaddelerden biri zeolitlerdir. Zeolitler kristal yapıları ve kimyasal özellikleri nedeni ile günümüz endüstrisinin yeri tutulmaz hammaddeleridir .

Zeoliti 1756’da İsveç’li mineralog Cronstedt keşfetti ve doğal zeoliti sınıflandırdı. Keşfettiği zeolit ısıtıldığında çok çabuk su kaybeden yapısından dolayı Latince “zeo” ve kaya parçalarının ısıtılmasına da “lithos” denilmesinden dolayı malzemeye Zeolit adını vermiştir.

Damour 1857’de zeolitin hidrasyon-dehidrasyon özelliğini kayıt etti [26]. Eichorn (1858) zeolitin iyon-değişimi özelliğini buldu [27]. Weighel ve Steinhoff (1925) zeolit taneciklerinin gaz moleküllerini iç bünyelerine aldığını ispatladılar [28]. Mc.

Bain (1932) popüler olan ve bugün de kullanılan "molecular sieving" (moleküler elek) özelliğini gösterdi [29]. Bunun nedeni, zeolitlerin kristal kafesleri içindeki kanal genişliklerine bağlı olarak, gaz moleküllerinin boylarına ve yapılarına göre, bazı moleküllerin geçmelerine izin vermeleri, bazılarını geri çevirmeleri ve bazılarını da yüze soğurmalarıdır. Doğal zeolitlerin mineral olarak tanınmaları 1976 yılına rastlar [30]. Bu konuda 1970'den günümüze kadar çok sayıda zeolit türü incelendi. Endüstriyel ve ticari alanda çeşitli uygulama alanları üzerinde araştırmalar yapılmaktadır.

Ancak endüstriyel kullanımı bu kadar önemli olan zeolit minerallerinin, doğada volkanik kayaların boşluklarında, müzelerde saklanabilecek kadar az miktarda bulunduğu bilinmesi, araştırmacıları yapay zeolit üretme olanaklarını araştırmaya itmiştir. 1948'de Union Carbide Corporation'un başlattığı araştırmalar olumlu sonuçlanmış ve yapay zeolitler üretilmeye başlamıştır. Fakat yapay üretimlerinin pahalı oluşu, büyük miktarlarda üretim yapılabilecek doğal zeolit yataklarının aranmasını hızlandırmıştır [31].

Çalışmamızda kullanılan zeoliti Manisa Gördes de Fabrikası bulunan Rota Madencilik Tarafından temin edilmiştir. Malzemenin kimyasal analizleri tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 4.5. Kullanılan Zeolitin Kimyasal Analiz Sonucu

SiO ₂	71.0%
CaO	3.4%
Fe ₂ O ₃	1.7%
Al ₂ O ₃	11.8%
K ₂ O	2.4%
MgO	1.4%
Na ₂ O	0.4%
TiO ₂	0.10%

Tablo 4.6. Kullanılan Zeolitın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Görünüş, Koku	Fil Dişi, Kokusuz
Parlaklık	70 %
Özgül ağırlık:	2000-2400 kg/m ³
Birim Hacim Ağırlık	1260-1906 kg/m ³
Sertlik	2-3 Mohs
Porozite	49,3 %
Abrasion:	87 (mg/100g)
Su Emme Kapasitesi	46,5%
Yağ Emme Kapasitesi	57 (mg/100g)
Katyon Değişimi Kapasitesi	1,5 – 1,8 meq/g

Doğal ve yapay zeolitlerinin çoğunun temel kristal yapısı bilinmektedir. Zeolitlerin sınıflandırılması çok yüzeylilerinin dilimlerine göre yapılmaktadır. Bugün 90 değişik yapıda yapay zeolit üretilmiştir. Bunlardan bazılarının kristal yapıları bilinen doğal zeolitlere benzemektedir. Fakat birçoklarının kristal yapısı henüz çözümlenmemiştir [30]. Zeolit oluşum ortamlarına göre altı grupta toplanmıştır [32]:

1. Kapalı tuzlu sulu göllerde biriken volkanik malzemenin göl suyu ile kimyasal tepkimesi sonucu oluşan zeolit yatakları.
2. Açık tatlı veya az tuzlu göllerde biriken volkanik malzemenin göl suyu ile kimyasal tepkimesi sonucu oluşan zeolit yatakları.
3. Kıyı veya derin denizel ortamlarda biriken volkanik malzemenin deniz suyu ile kimyasal tepkimesi sonucu oluşan zeolit yatakları.
4. Düşük ısı gömülme metamorfizması ile volkanik malzemedan veya kalın tortul dizilim içindeki diğer Al - Si' li malzemedan oluşan zeolit yatakları.
5. Hidrotermal suların veya sıcak kaynak sularının etkisi ile Al-Si'li malzemenin bozunması sonucu oluşan zeolit yatakları.
6. Gölsel veya denizel ortamlarda oluşmuş, fakat köken kayacın volkanik malzemedan olduğunu belirleyici kanıtları izlenemeyen zeolit yatakları.

Türkiye her ne kadar özellikle Batı Anadolu Bölgesi'nde zengin zeolit yataklarının sahip ise de zeolitin endüstriyel kullanımı henüz tam olarak geliştirilememiştir. Son yıllarda Türkiye'de zeolit kullanımı daha çok atık suların sertliğinin giderilmesi ve zirai amaçlar üzerine yoğunlaşmıştır [18].

BÖLÜM 5. YAPILAN DENEYLER VE UYGULANAN METOTLAR

Stabilizasyon işlemi için laboratuvarında önceden belirlenmiş oranlarda karışımlar hazırlanmıştır. 24 saat $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'lık etüvde kurutulmuştur. Kurutulan malzemeler hassas terazide ağırlıkça yüzdelerine tartılarak mikserde karıştırılmıştır. Deneyler farklı karışımlar üzerinde yapılmıştır. İlk deney numunesi %100 Bentonit kili olarak belirlenmiştir. İkinci karışıma sadece %10 Kireç ilave edilmiştir. Sonraki karışımlarda ise %10 Kireç sabit tutulup Zeolit ve Uçucu Kül katılmıştır. Birlikte sırasıyla %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında karıştırılmıştır. Bu oranlar Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Kullanılan Katkı Oranları

Sıra No	Karşımlar
1	%100 Kil
2	%100 Kil+%10 Kireç
3	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit
4	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 5 Uçucu Kül
5	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 10 Uçucu Kül
6	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 15 Uçucu Kül
7	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 20 Uçucu Kül
8	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 25 Uçucu Kül
9	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit
10	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 5 Uçucu Kül
11	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 10 Uçucu Kül
12	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 15 Uçucu Kül
13	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 20 Uçucu Kül
14	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 25 Uçucu Kül
15	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit
16	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 5 Uçucu Kül
17	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 10 Uçucu Kül
18	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 15 Uçucu Kül
19	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 20 Uçucu Kül
20	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 25 Uçucu Kül
21	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit
22	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 5 Uçucu Kül
23	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 10 Uçucu Kül
24	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 15 Uçucu Kül
25	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 20 Uçucu Kül
26	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 25 Uçucu Kül
27	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit
28	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 5 Uçucu Kül
29	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 10 Uçucu Kül
30	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 15 Uçucu Kül
31	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 20 Uçucu Kül
32	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 25 Uçucu Kül

Karışımlar suları ilave edildikten hemen sonra deneye tabi tutulmuştur. Sıkıştırma işlemi için titreşimli kompaksiyon aleti kullanılmıştır. Her bir karışım için optimum su muhtevası (w_{opt}) ve kuru birim ağırlık (γ_{kmak}) tespit edilmiştir. Bu su muhtevası ile hazırlanan karışım numuneleri özel hazırlanmış tüpler içerisine sıkıştırılarak alt ve üst tarafı mumlanarak 7 ve 28 günlük küre bırakılmıştır.



Şekil 5.1. Özel Tüp (a). İçi Boş Hali (b). Alt ve Üst Tarafını Mumlanmış Hali

5.1. Özgül Ağırlık

Karışımların özgül ağırlık deneyi TS 1900-1/2006'de verilen yönteme uygun olarak yapılmıştır [33]. Deneyde kullanılan alet ve malzemenin aynı sıcaklıkta olması için çalışılan deney odası sabit sıcaklıkta tutuldu. Sıcaklığın sabit tutulması için odadaki klima 24 saat açık konumda bekletilerek ve deney odası kapısının kapalı tutulmasına özen gösterilmiştir. Özgül ağırlık deney seti şekil 5.3 verilmiştir. Özgül ağırlığın hesaplanmasında uygulanan formül şu şekildedir [34];

$$G_s = \frac{\rho_L (W_2 - W_1)}{\rho_w (W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)} \quad (5.1)$$

Burada:

G_s = Özgül ağırlık

$\rho_w = \rho_L$ = Suyun yoğunluğu (1 gr/cm³)

W_1 = Piknometre ağırlığı (gr)

W_2 = Piknometre + numune ağırlığı (gr)

W_3 = Piknometre + numune + Su ağırlığı (gr)

W_4 = Piknometre + su ağırlığı (gr)

Bu çalışma sonunda elde edilen deney sonuçları Tablo 5.2’de gösterilmiştir.

Tablo 5.2. Karışımların özgül ağırlıkları

Sıra No	Karışımlar	Gs
1	%100 Kil	2.99
2	%100 Kil+%10 Kireç	2.77
3	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit	2.71
4	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	2.52
5	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	2.74
6	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	2.66
7	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	2.73
8	% 100 Kil+% 10 Kireç+% 5 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	2.73
9	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit	2.62
10	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	2.75
11	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	2.79
12	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	2.65
13	% 100 Kil+% 10 Kireç+% 10 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	2.78
14	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	2.60
15	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit	2.73
16	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	2.61
17	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	2.66
18	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	2.62
19	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	2.67
20	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	2.59
21	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit	2.55
22	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	2.60
23	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	2.58
24	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	2.59
25	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	2.65
26	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	2.71
27	% 100 Kil+% 10 Kireç+% 25 Zeolit	2.53
28	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	2.62
29	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	2.65
30	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	2.63
31	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	2.73
32	% 100 Kil+% 10 Kireç+% 25 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	2.60



Şekil 5.2. Özgül Ağırlık Deney Seti 1. Piknometre 2. Desikatör 3. Vakum Pompası

5.2. Likit ve Plastik Limit Deneyi

5.2.1. Likit limit deneyi

Zeminin plastik durumdan (hamur kıvamından) akıcı duruma geçtiği andaki su muhtevasının sayısal değerine zemin likit limiti denmektedir. Likit limit deneyi TS1900-1/2006 yöntemine göre yapılmıştır [33]. Numuneler etüvde kurutulduktan sonra karışım oranına göre tartılıp likit kıvama gelene kadar su ilave edilmiştir. Su yüzdesi en az dört noktada arttırılmıştır. Likit Limit deney seti Şekil 5.3’de verilmiştir. Deney sonunda likit limit su muhtevası (w_L) şu formülle hesaplanmıştır [33];

$$W_L = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100 \quad (5.2)$$

Burada:

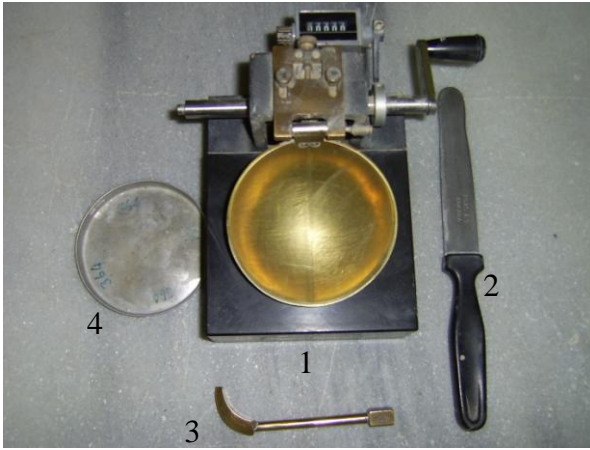
W_L = Likit limit

W_1 = Kap ağırlığı (gr)

W_2 = Kap + ıslak numune ağırlığı (gr)

w_3 = Kap + kuru numune ağırlığı (gr)

Deney sonunda elde edilen Likit limit değerleri Tablo 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Likit Limit Seti 1. Casagrende Aleti 2. Spatula 3. Oluk Açma Bıçağı 4. Numune Kurutma Kabı

5.2.2. Plastik limit deneyi

Zeminlerin katı durumdan plastik kıvama geçtiği andaki su muhtevası değerine zeminin plastik limiti denir. Plastik limit deneyi TS 1900-1/2006'e göre, likit kıvam deneyi yapılırken spatula yardımıyla bir miktar numune standartta belirtilen pürüzlü cam yüzey üzerine serilir ve laboratuvar ortamında kurması beklenir. Plastik kıvama geldiği anda bıçak ile cam yüzey üzerinden kazınarak standarda uygun şekilde deney yapılır [33].

Plastik limit su muhtevası (w_p) Őu formülle hesaplanmıştır [34];

$$W_p = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100 \quad (5.3)$$

Burada:

W_p = Plastik limit

W_1 = Kap aŐırlıŐı (gr)

W_2 = Kap + ıslak numune aŐırlıŐı (gr)

W_3 = Kap + kuru numune aŐırlıŐı (gr)

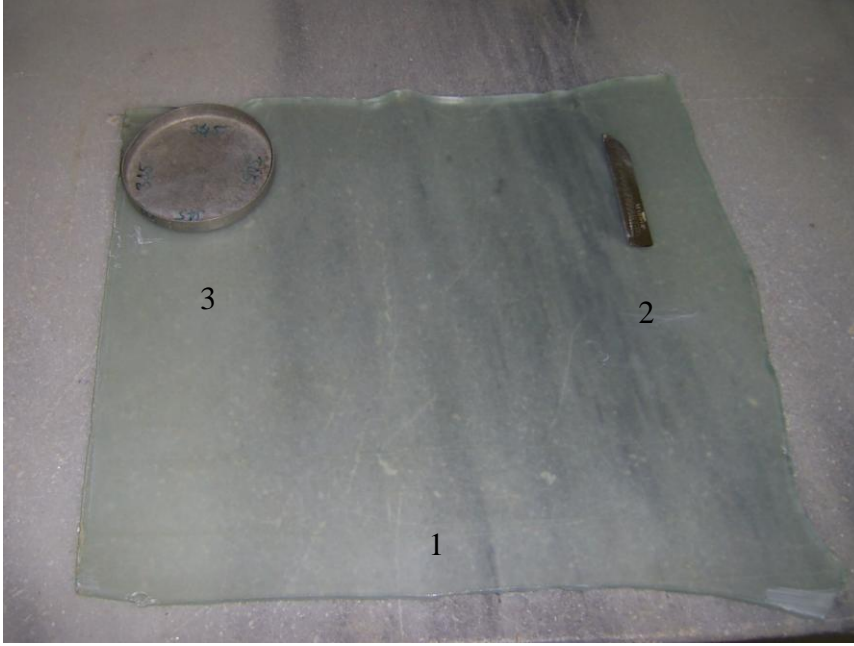
Likit limit ve plastik limitin su muhtevasının farkı plastisite indisi (I_p) olarak adlandırılmakta ve Őu formülle hesaplanmıştır [34];

$$I_p = (W_L - W_p) \quad (5.4)$$

Deney sonunda elde edilen Likit limit ve plastisite indisi deŐerleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Karışımların kıvam limitleri ve plastisite indisleri

Sıra No	Karışımlar	Likit Limit (LL) (%)	Plastik Limit (PL) (%)	Plastisite İndisi (Ip) (%)
1	%100 Kil	66	19	47
2	%100 Kil+%10 Kireç	43	23	20
3	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit	46	25	21
4	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	49	27	22
5	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	47	26	21
6	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	46	27	19
7	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	41	25	16
8	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	42	26	16
9	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit	40	25	15
10	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	43	26	17
11	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	49	27	22
12	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	44	26	18
13	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	46	27	19
14	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	46	26	20
15	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit	48	27	21
16	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	40	28	12
17	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	40	30	10
18	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	40	28	12
19	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	40	26	14
20	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	41	27	14
21	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit	47	30	17
22	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	44	29	15
23	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	44	27	17
24	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	41	28	13
25	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	38	29	9
26	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	43	29	14
27	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit	39	26	13
28	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	41	27	14
29	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	45	28	17
30	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	47	28	19
31	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	42	29	13
32	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	38	26	12

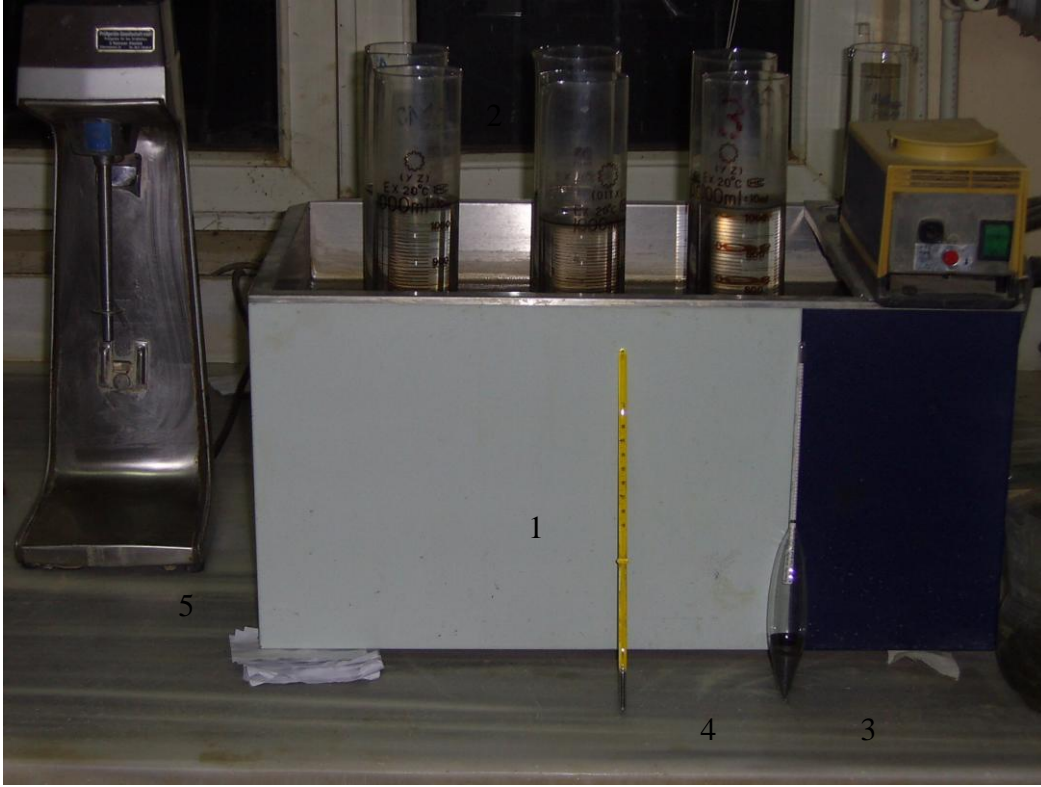


Şekil 5.4. Plastik Limit Deney Seti 1. Pürüzlü Cam 2. Bıçak 3. Numune Kurutma Kabı

5.3. Dane Çapı Dağılımı ve Zemin Sınıflandırması

5.3.1. Hidrometre deneyi

İnce daneli zeminlerin (siltler ve killer) dane çapı dağılımı hidrometre deneyi ile bulunmaktadır. Bu deneyde süspansiyon içindeki çökelme hızlarının, dane çapına bağlı olarak değiştiğini gösteren “Stokes kanunu” kullanılmaktadır. 50 g zemin numunesi mekanik bir karıştırıcı ile karıştırılarak suda bir süspansiyon haline getirilir, değişik zamanlarda süspansiyonun yoğunluğu bir pipetle numune olarak veya bir hidrometre ile ölçülmekte, süspansiyonda kalan danelerin çapı hesaplanmaktadır.

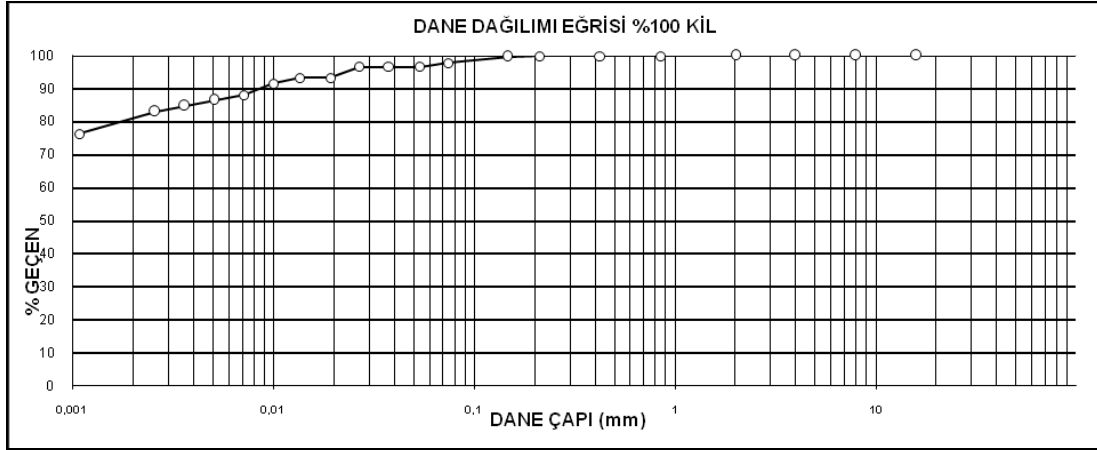


Şekil 5.5. Hidrometre Deney Seti 1. Sabit Sıcaklıklı Havuz 2. Mezur 3. Hidrometre 4. Derece 5. Mikser

Zemin daneleri su içinde bir süspansiyon haline getirilirken, danelerin birbirine ayrışması için çözelti malzemesi olarak Sodyumhexameta-fosfat kullanılmaktadır. Süspansiyon iyice karıştırıldıktan sonra, çökelmeye bırakılması anından itibaren 24 saatlik değişen zaman aralıklarında yoğunluk ölçümleri yapılarak zemin içindeki dane çaplarının dağılımı elde edilmektedir. Stokes kanunun küresel daneler için geçerli olması, buna karşılık zeminler içindeki ince danelerin plaka şeklinde olmaları nedeniyle bu deneyin yaklaşık sonuçlar verdiği bilinmektedir. Daha doğru bir pratik yöntem geliştirilmiş olmadığı için, uygulamada bu deney kullanılmaya devam edilmektedir. Deney için TS 1900-1/2006'da anlatılan yöntem kullanılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.5'te görülmektedir. Hidrometre deney seti şekil 5.5'de verilmiştir. Şekil 5.6'de ise bentonite ait dane dağılım eğrisi görülmektedir.

Tablo 5.4. Hidrometre deney sonuçları

Sıra No	Karşımlar	Silt %	Kil %
1	%100 Kil	16.81	81.00
2	%100 Kil+%10 Kireç	71.45	17.00
3	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit	69.36	23.00
4	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	48.53	45.00
5	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	54.82	38.00
6	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	57.13	36.00
7	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	62.33	30.00
8	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	64.00	30.00
9	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit	63.34	29.00
10	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	63.39	31.00
11	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	46.16	48.00
12	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	55.15	37.00
13	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	46.33	47.00
14	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	53.45	40.00
15	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit	34.20	57.00
16	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	64.05	30.00
17	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	65.34	27.00
18	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	64.45	28.00
19	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	65.90	28.00
20	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	63.00	30.00
21	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit	50.62	43.00
22	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	54.32	40.00
23	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	50.23	43.00
24	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	64.74	30.00
25	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	78.25	17.00
26	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	62.25	33.00
27	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit	72.81	20.00
28	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	64.54	28.00
29	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	59.66	34.00
30	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	55.13	38.00
31	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	60.59	32.00
32	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	71.05	20.00



Şekil 5.6. Bentonit Kili Dane Dağılımı

5.3.2. Elek analizi (ıslak eleme)

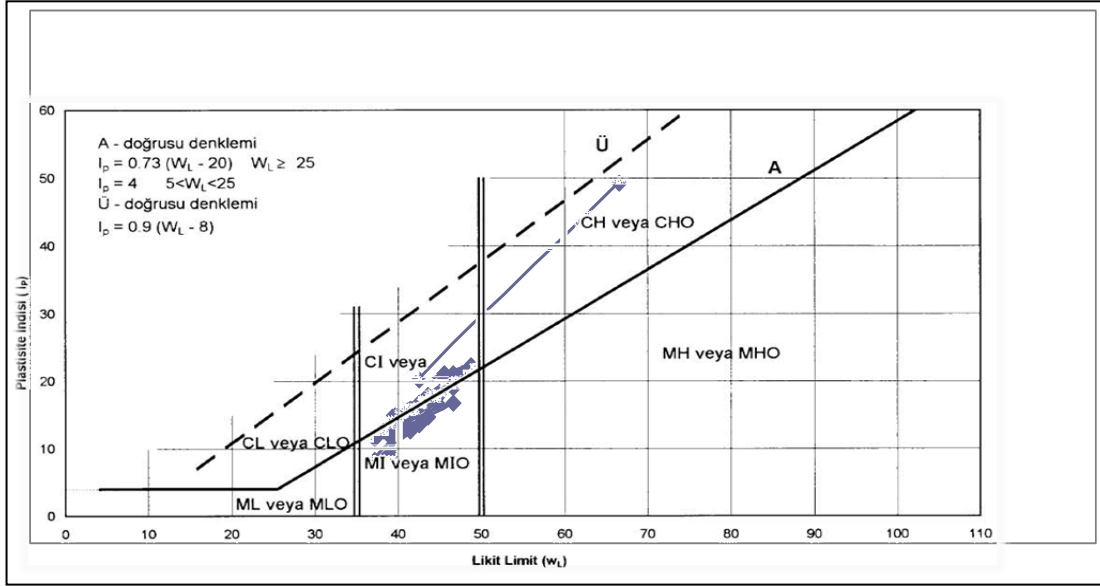
Islak eleme sürekli akan bir su kaynağının altında zeminin ince malzemelerinin yıkanması esasına dayanmaktadır. Yıkama sonunda en son 200 no'lu (75 μ m) elek üzerinde kalan malzeme miktarı belirlenerek hesap yapılmaktadır. Islak eleme sonucu elde edilen değerler Tablo 5.5'de gösterilmiştir.

Tablo 5.5. Islak eleme deney sonuçları

Sıra No	Karşımlar	Kum (%)	Silt + Kil (%)
1	%100 Kil	2.19	97.81
2	%100 Kil+%10 Kireç	11.55	88.45
3	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit	7.64	92.36
4	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	6.47	93.53
5	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	7.18	92.82
6	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	6.87	93.13
7	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	7.67	92.33
8	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	6.00	94.00
9	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit	7.66	92.34
10	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	5.61	94.39
11	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	5.84	94.16
12	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	7.85	92.15
13	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	6.67	93.33
14	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	6.55	93.45
15	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit	8.80	91.20
16	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	5.95	94.05
17	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	7.66	92.34
18	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	7.55	92.45
19	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	6.10	93.90
20	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	7.00	93.00
21	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit	6.08	93.92
22	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	5.68	94.32
23	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	6.77	93.23
24	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	5.26	94.74
25	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	4.75	95.25
26	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	7.19	92.81
27	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit	7.46	92.54
28	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	6.34	93.66
29	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	6.87	93.13
30	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	5.34	94.66
31	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	7.41	92.59
32	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	8.95	91.05

5.3.3. Zemin sınıflandırması

Karışımların sınıflandırılması için TS 1500/2000’de önerilen birleşik zemin sınıflandırma metodu kullanılmıştır. Şekil 5.7’de Plastisite kartı verilmiştir. Sınıflandırma sonunda elde edilen değerler Tablo 5.6’da verilmiştir[35].



Şekil 5.7. Plastisite Kartı (TS 1500/2000)

Tablo 5.6. Karışımların zemin sınıfları

Sıra No	Karışımlar	Zemin Sınıfı
1	%100 Kil	CH
2	%100 Kil+%10 Kireç	CI
3	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit	CI
4	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	CI
5	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	CI
6	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	CI
7	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	CI
8	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	CI
9	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit	CI
10	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	CI
11	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	CI
12	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	CI
13	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	CI
14	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	CI
15	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit	CI
16	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	MI
17	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	MI
18	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	MI
19	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	MI
20	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	MI
21	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit	MI
22	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	MI
23	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	MI
24	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	MI
25	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	MI
26	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	MI
27	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit	MI
28	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	MI
29	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	MI
30	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	MI
31	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	MI
32	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	MI

5.4. Kompaksiyon Deneyi

Optimum su muhtevası (w_{opt}) ve zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığındaki su muhtevası olarak tarif edilmektedir. Deney TS 1900-1/2006’de önerildiği şekilde uygulanmıştır. Deneylere %20 su miktarıyla başlanmış ve titreşimli tokmak kullanılmıştır. Titreşimli Kompaksiyon deney seti şekil 5.8’da verilmiştir. Deney sonuçları Tablo 5.7’de verilmektedir.



Şekil 5.8. Titreşimli Kompaksiyon Deney Seti 1. Hitli 2. Kompaksiyon Kalıbı 3. Titreşimli Tokmak

Tablo 5.7. Karışımların optimum su muhtevası ve kuru birim ağırlıkları

Sıra No	Karışımlar	Optimum Su Muhtevası (w_{opt}) %	Maksimum Kuru Birim Ağırlık (γ_k) kN/m ³
1	%100 Kil	55	9.80
2	%100 Kil+%10 Kireç	40	10.60
3	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit	41	10.60
4	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	35	11.70
5	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	35	11.30
6	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	35	11.70
7	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	40	11.30
8	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	35	11.40
9	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit	45	10.20
10	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	42	10.50
11	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	41	10.40
12	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	40	10.50
13	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	40	10.80
14	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	40	11.00
15	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit	45	10.20
16	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	46	10.00
17	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	40	10.70
18	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	42	10.70
19	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	41	10.60
20	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	38	10.80
21	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit	41	10.50
22	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	40	10.70
23	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	40	11.10
24	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	39	10.70
25	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	39	10.80
26	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	36	10.80
27	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit	43	10.30
28	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	40	10.60
29	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	40	10.60
30	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	39	10.60
31	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	38	10.80
32	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	38	10.70

5.5. Serbest Basınc Deneyi

Zeminlerin kayma mukavemetini belirlemek için yapılmaktadır. Deney TS 1900-2/2006'de önerildiği şekilde uygulanmıştır [36]. Laboratuvarında, her bir karışım için mukavemetleri belirlenmiş ve elde edilen kayma dayanımları Tablo 5.8'de verilmiştir. Deney Seti şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Üç Eksenli Deney Seti

Tablo 5.8. Karışımların serbest basınç deneyi sonucu kayma dayanımları

Sıra No	Karışımlar	Günlük $q_{u \text{ maks}}$ (kPa)	7 gün kürlü $q_{u \text{ maks}}$ (kPa)	28 gün kürlü $q_{u \text{ maks}}$ (kPa)
1	%100 Kil	28	--	--
2	%100 Kil+%10 Kireç	112	254	197
3	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit	160	309	226
4	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	196	388	274
5	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	212	467	289
6	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	250	499	312
7	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	264	538	344
8	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	280	600	367
9	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit	200	583	808
10	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	266	368	621
11	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	258	698	393
12	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	244	754	305
13	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	227	957	439
14	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	208	817	354
15	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit	389	543	350
16	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	417	612	420
17	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	560	696	378
18	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	596	713	342
19	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	634	298	286
20	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	686	633	301
21	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit	427	958	171
22	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	578	744	426
23	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	714	697	373
24	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	796	351	544
25	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	825	744	419
26	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	902	533	385
27	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit	504	788	466
28	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	488	677	243
29	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	486	848	452
30	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	428	587	866
31	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	366	426	285
32	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	278	623	428

5.6. Üç Eksenli UU Deneyi

Zeminlerin kayma mukavemetini saptamak için laboratuvar deney yöntemleri arasında en gelişmiş olan yöntemdir. Bu deney ile, zeminin arazi koşullarında sahip olacağı kayma mukavemeti gerçek koşullara en yakın olarak belirlenmektedir. Üç eksenli basınç deneyinde kontrol edilebilen ve ölçülebilen parametreler şu şekilde sıralanabilir:

1. Zemin numunesi arazi gerilmeleri altında konsolide edebilmekte ve suya doygunluk derecesi kontrol edebilmektedir.
2. Yanal ve eksenel gerilmeleri uygulamak sureti ile arazi yüklemeye izlerine yakın yüklemeler yapılabilir.
3. Eksenel yüklemeye sırasında drenajsız veya drenajlı koşullar sağlanabilmektedir.
4. Drenajsız yüklemelerde numunede oluşan boşluk suyu basıncı artışları, drenajlı deneylerde ise meydana gelen hacim değişimleri ölçülebilmektedir.

Bu çalışmada Konsolidasyonsuz Drenajsız Deney (UU-Unconsolidated Undrained) kullanılmıştır. Deneyde çevre (hücre) basıncı uygulandıktan hemen sonra deviatör gerilme artırılarak numunenin kesilmesi sağlanmıştır. Deviatör gerilmenin hızlı bir şekilde uygulanması ile deney süresince numunedeki suyun drenajına müsaade edilmemektedir. Bu deneyin doygun haldeki kil numunelerle yapılması halinde içsel sürtünme açısı ($\phi=0$) daima sıfır olmaktadır. Deney sonunda zeminin kohezyonu (c) elde edilmektedir. Deney TS 1900-2/2006'da önerilen metoda uygun olarak yapılmıştır. Deney 100 kPa ve 200 kPa çevre basıncı altında yapılmıştır. İki çevre basıncı için de kayma dayanımları hesaplanıp ortalaması alınmıştır. Elde edilen q_u değerleri Tablo 5.9'da gösterilmiştir. Deney cihazı Şekil 5.10'da verilmiştir.

Tablo 5.9. Karışımların Üçeksenli Deney, Maksimum Kayma Dayanımları (c) değerleri

Sıra No	Karışımlar	Kür süresi sonunda q_u (kPa)		
		Gününde	7 Gün	28 Gün
1	%100 Kil	47	--	--
2	%100 Kil+%10 Kireç	275	450	425
3	%100 Kil+%10 Kireç+%5 Zeolit	253	548	520
4	%100 Kil+%10 Kireç+%5 Zeolit + %5 Uçucu Kül	231	510	877
5	%100 Kil+%10 Kireç+%5 Zeolit + %10 Uçucu Kül	280	843	834
6	%100 Kil+%10 Kireç+%5 Zeolit + %15 Uçucu Kül	236	387	749
7	%100 Kil+%10 Kireç+%5 Zeolit + %20 Uçucu Kül	652	782	772
8	%100 Kil+%10 Kireç+%5 Zeolit + %25 Uçucu Kül	348	584	746
9	%100 Kil+%10 Kireç+%10 Zeolit	227	708	864
10	%100 Kil+%10 Kireç+%10 Zeolit + %5 Uçucu Kül	258	740	584
11	%100 Kil+%10 Kireç+%10 Zeolit + %10 Uçucu Kül	383	911	801
12	%100 Kil+%10 Kireç+%10 Zeolit + %15 Uçucu Kül	471	1073	621
13	%100 Kil+%10 Kireç+%10 Zeolit + %20 Uçucu Kül	809	1022	724
14	%100 Kil+%10 Kireç+%10 Zeolit + %25 Uçucu Kül	686	453	532
15	%100 Kil+%10 Kireç+%15 Zeolit	568	555	498
16	%100 Kil+%10 Kireç+%15 Zeolit + %5 Uçucu Kül	621	461	675
17	%100 Kil+%10 Kireç+%15 Zeolit + %10 Uçucu Kül	718	679	526
18	%100 Kil+%10 Kireç+%15 Zeolit + %15 Uçucu Kül	872	739	531
19	%100 Kil+%10 Kireç+%15 Zeolit + %20 Uçucu Kül	895	746	628
20	%100 Kil+%10 Kireç+%15 Zeolit + %25 Uçucu Kül	1319	804	603
21	%100 Kil+%10 Kireç+%20 Zeolit	535	689	455
22	%100 Kil+%10 Kireç+%20 Zeolit + %5 Uçucu Kül	789	923	629
23	%100 Kil+%10 Kireç+%20 Zeolit + %10 Uçucu Kül	772	931	702
24	%100 Kil+%10 Kireç+%20 Zeolit + %15 Uçucu Kül	415	530	666
25	%100 Kil+%10 Kireç+%20 Zeolit + %20 Uçucu Kül	984	1148	750
26	%100 Kil+%10 Kireç+%20 Zeolit + %25 Uçucu Kül	1253	1609	654
27	%100 Kil+%10 Kireç+%25 Zeolit	741	970	963
28	%100 Kil+%10 Kireç+%25 Zeolit + %5 Uçucu Kül	807	1064	464
29	%100 Kil+%10 Kireç+%25 Zeolit + %10 Uçucu Kül	1057	1316	408
30	%100 Kil+%10 Kireç+%25 Zeolit + %15 Uçucu Kül	729	1035	735
31	%100 Kil+%10 Kireç+%25 Zeolit + %20 Uçucu Kül	744	1052	380
32	%100 Kil+%10 Kireç+%25 Zeolit + %25 Uçucu Kül	751	1059	638



Şekil 5.10. Üçekslenli Deney Hücresi

5.7. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR)

Kaliforniya Taşıma Gücü deneyi kuru olarak belirlenmiştir. CBR için TS 1900-2/2006 yöntemi kullanılmıştır. Karışımlar optimum su muhtevasında karıştırılmış ve günlük 7, 28 günlük kürlerde özel tüplerde muflanarak bekletilmiştir. CBR kalıbına titreşimli kompaksiyon aleti ile üç kademe halinde her kademeye 1 dakikalık süreyle sıkıştırılmıştır. Kalıplarda sıkıştırılan numunelere 10 ton'luk kuvvetle basınç uygulanıp kürde bekletilmek üzere diğer özel tüplerin içerisine 7 ve 28 günlük küre alınmıştır. Karışımların kuru maksimum CBR değerleri Tablo 5.11'da görülmektedir.



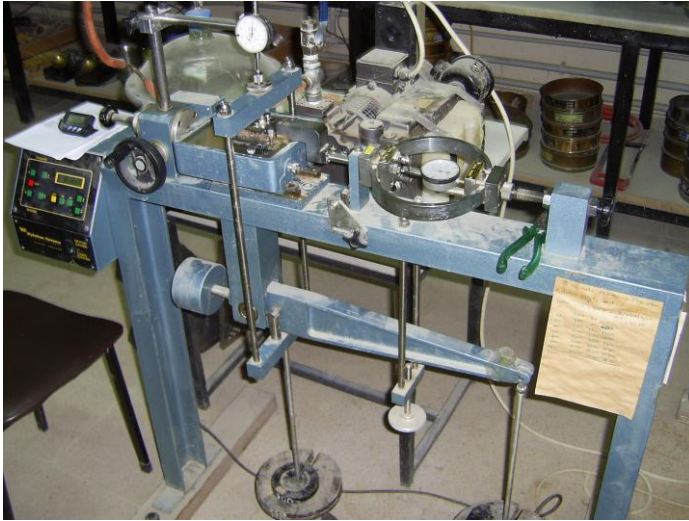
Şekil 5.11. CBR Deneyi

Tablo 5.10. Karışımların Kuru Maksimum CBR değerleri

Sıra No	Karışımlar	Günlük CBR	7 Günlük CBR	28 Günlük CBR
1	%100 Kil	15	--	--
2	%100 Kil+%10 Kireç	23	48	70
3	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit	20	44	77
4	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	21	42	90
5	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	20	45	68
6	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	23	49	92
7	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	56	68	95
8	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	48	76	67
9	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit	50	62	85
10	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	35	50	110
11	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	27	80	75
12	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	44	58	81
13	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	31	62	111
14	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	57	78	82
15	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit	25	39	64
16	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	27	63	83
17	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	16	60	73
18	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	35	56	77
19	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	13	56	77
20	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	45	74	78
21	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit	51	73	90
22	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	24	83	105
23	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	28	84	90
24	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	32	78	82
25	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	71	76	98
26	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	55	71	78
27	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit	41	55	75
28	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	62	75	85
29	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	68	73	79
30	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	38	80	91
31	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	63	75	72
32	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	69	67	73

5.8. Kesme Kutusu Deneyi

Kompaksiyon deneyi sonucunda bulunan w_{opt} değerleri doğrultusunda karışım oranlarına göre hazırlanıp günlük ve kürde bekletilmiş numunelere kesme kutusu halkaları yardımıyla rselemeden kalıpdan numuneler alınmıştır. Numunelerin ortamdaki sıcaklıktan etkilenmeden yani su muhtevasını kayıp etmeden kesme kutusu deneyi TS 1900-2/2006 uygun şekilde yapılarak numunelerin kayma parametreleri belirlenmiştir. Zeminin ve önceden belirlenmiş oranlarda katkılı zeminin kesme kutusu deneyinden elde edilen kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Deney cihazı şekil 5.12'de verilmiştir. Deneyler sonuçları günlük değerleri Tablo 5.11'de, 7 günlük kür sonuçları Tablo 5.12'de ve 28 günlük kür sonuçları 5.12'de verilmiştir.



şekil 5.12. Kesme Kutusu Deney Aleti

Tablo 5.11. Kesme Kutusu Deneyi Günlük Yapılan Deneylerin Sonuçları

Sıra No	Karışımlar	Günlük c (kPa)	Günlük ϕ (°)
1	%100 Kil	36	0
2	%100 Kil+%10 Kireç	39	13
3	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit	4	27
4	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	7	25
5	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	7	21
6	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	0	51
7	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	14	2
8	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	69	6
9	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit	0	31
10	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	19	21
11	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	0	26
12	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	0	20
13	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	0	17
14	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	0	13
15	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit	0	37
16	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	7	20
17	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	149	0
18	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	8	11
19	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	0	49
20	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	19	19
21	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit	104	0
22	%100 Kil+% 10 Kireç+% 20 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	0	43
23	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	0	44
24	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	22	17
25	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	11	17
26	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	19	7
27	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit	56	24
28	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	63	30
29	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	59	23
30	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	95	38
31	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	59	26
32	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	63	34

Tablo 5.12. Kesme Kutusu Deneyi 7 Günlük Kürde Bekletilen Deneylerin Sonuçları

Sıra No	Karışımlar	7 Günlük c (kPa)	7 Günlük ϕ (°)
1	%100 Kil	--	--
2	%100 Kil+%10 Kireç	22	17
3	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit	41	5
4	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	69	7
5	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	39	0
6	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	0	17
7	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	23	0
8	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	47	13
9	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit	0	38
10	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	0	12
11	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	64	0
12	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	29	17
13	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	26	1
14	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	0	22
15	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit	0	38
16	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	34	18
17	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	0	25
18	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	36	2
19	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	33	11
20	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	30	0
21	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit	66	0
22	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	71	0
23	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	78	1
24	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	55	1
25	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	29	1
26	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	80	0
27	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit	80	0
28	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	74	0
29	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	57	10
30	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	100	0
31	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	86	0
32	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	39	0

Tablo 5.13. Kesme Kutusu Deneyi 28 Günlük Kürde Bekletilen Deneylerin Sonuçları

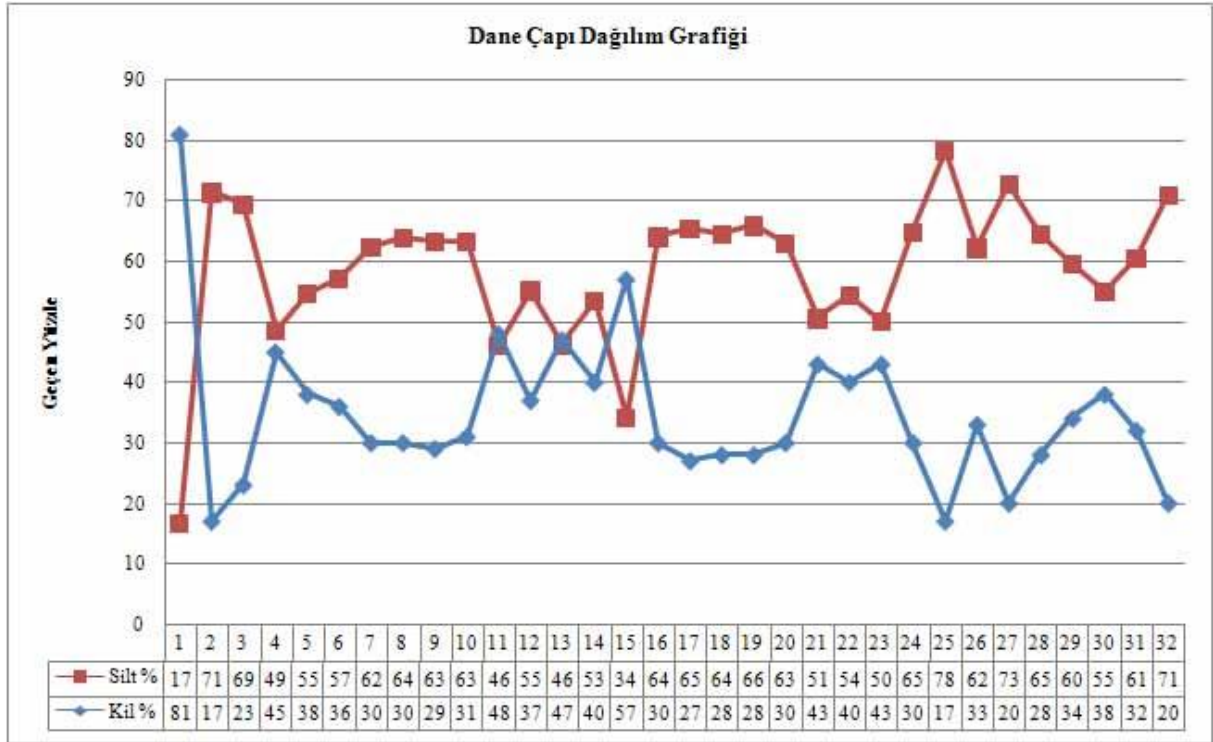
Sıra No	Karışımlar	28 Günlük c (kPa)	28 Günlük ϕ (°)
1	%100 Kil	--	--
2	%100 Kil+%10 Kireç	1	30
3	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit	0	35
4	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	3	38
5	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	55	14
6	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	13	27
7	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	36	25
8	%100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	5	30
9	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit	11	35
10	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	0	45
11	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	0	33
12	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	52	16
13	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	20	24
14	%100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	0	31
15	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit	50	35
16	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	15	25
17	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	5	25
18	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	37	11
19	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	0	30
20	%100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	0	38
21	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit	0	25
22	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	0	62
23	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	61	17
24	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	39	26
25	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	0	51
26	%100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	0	34
27	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit	0	44
28	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 5 Uçucu Kül	4	27
29	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 10 Uçucu Kül	0	36
30	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 15 Uçucu Kül	23	26
31	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 20 Uçucu Kül	0	38
32	%100 Kil+%10 Kireç+% 25 Zeolit + % 25 Uçucu Kül	0	24

BÖLÜM 6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

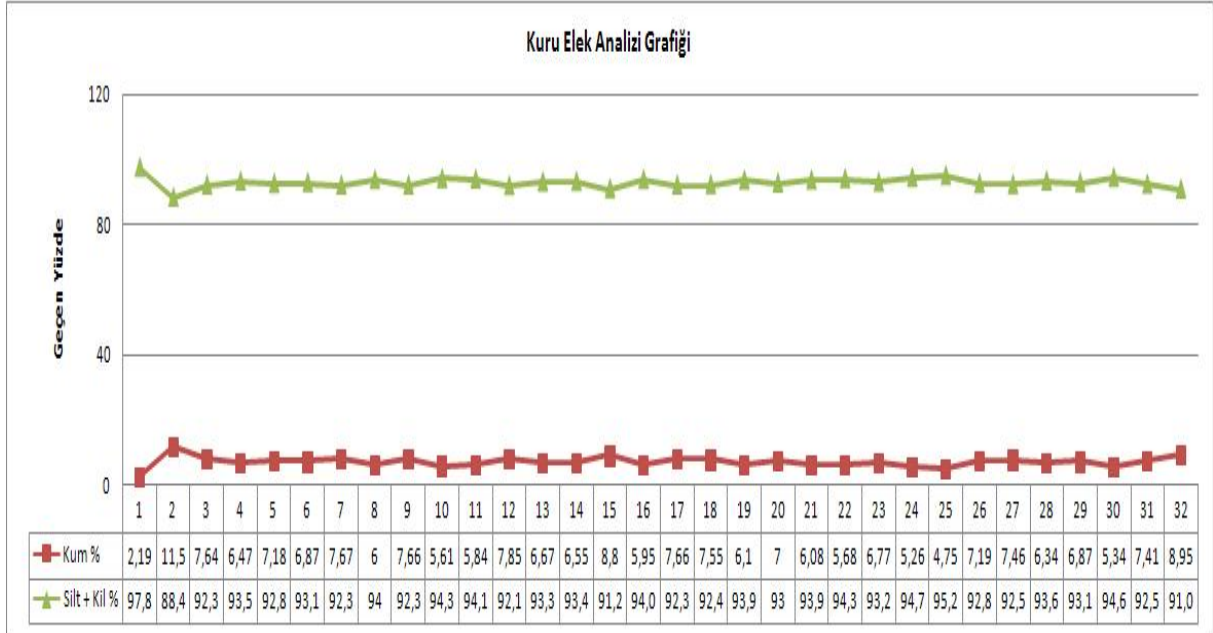
Çankırı'dan alınan bentonit kiline %10 kireç sabit tutulup önceden belirlenen oranlarda Yumurtaılık Sugözü Termik Santralı uçucu külü ve Balıkesir Gördes zeoliti ilave edilmiştir. Hazırlanan numuneler gününde, 7 ve 28 günlük kür sürelerince hatalar en aza indirilmiştir. Karışımlar üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçları tablolar halinde Bölüm 5'de sunulmuştur.

6.1. Karışımların Dane Çapı Dağılımı

Karışımların dane çapı dağılımı için, sabit sıcaklıktaki etüvde kurutulup önceden belirlenen oranlarda ilave edilerek karışımlar hazırlanmıştır. Deney sonuçları Bölüm 5.3.1'de Tablo 5.4'de sunulmuştur. Şekil 6.1'de hidrometre deney sonucunun grafiği verilmiştir. Elde edilen dane çapı dağılımına yüzdelerine göre zeolit ve uçucu kül katkı oranları artarken genellikle kil yüzdesinin azaldığı silt yüzdesinin arttığı görülmüştür. Hidrometre deneyinden sonra yapılan kuru elek analizi Şekil 6.2'de verilmiştir. Deney sonuçları Bölüm 5.3.2'de Tablo 5.5'de sunulmuştur. Bentonit kilinde ve karışımlarda kum içeriğine rastlanmış ve katkı oranları arttıkça kum oranının sabit kaldığı belirlenmiştir.



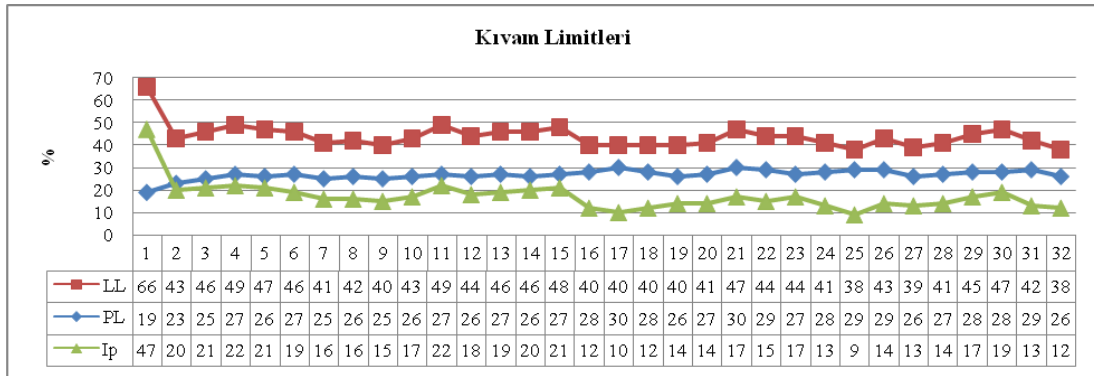
Şekil 6.1. Hidrometre Dane Çapı Dağılım Grafiği



Şekil 6.2. Kuru Elek Analizi Grafiği

6.2. Karışımların Kıvam Limitleri

Kil numunesi ve katkı malzemeleri etüvden çıkartıldıktan sonra karışım oranlarınca birbirine karıştırılarak yapılan likit limit ve plastik limit deneylerinden katkı oranlarının artması ile plastisite indisin %100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 25 Uçucu Kül karışımına kadar likit limit ve plastik limitin arttığı, %100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit karışımından sonra düştüğü belirlenmiştir.



Şekil 6.3. Likit Limit, Plastik Limit ve Plastisite İndisi İlişki Grafiği

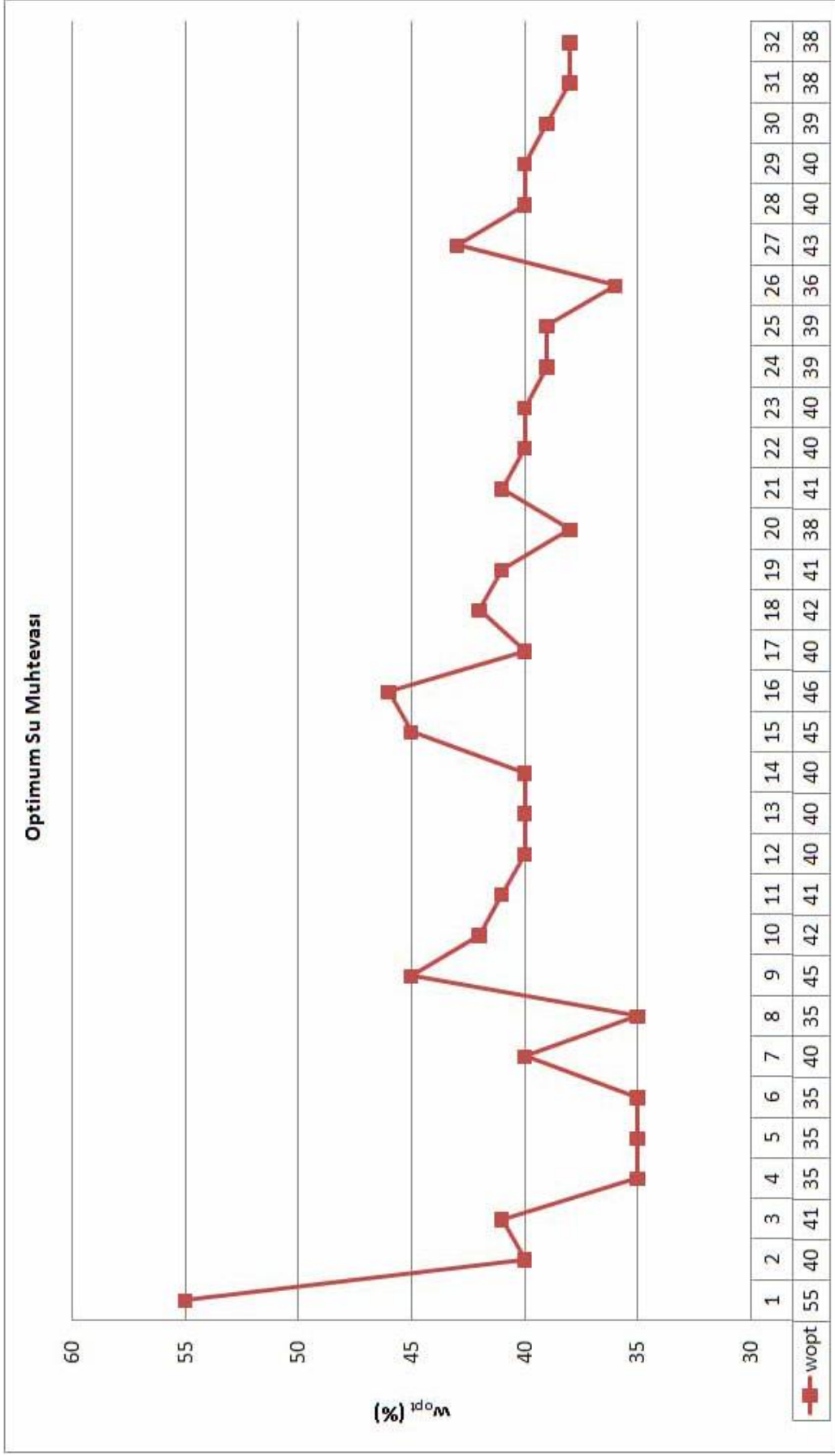
6.3. Karışımların Zemin Sınıflandırmaları

Bentonit kilin zemin sınıfı TS 1500/2000'ne göre CH yüksek plastisiteli kil zemin olduğu belirlenmiştir. Kil numunesine katkı malzemeleri ilave edildikçe %100 Kil+%10 Kireç 'den %100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolite kadar CI orta plastisiteli kil, %100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit'den sonrasında ise MI düşük plastisiteli kil olduğu tespit edilmiştir.

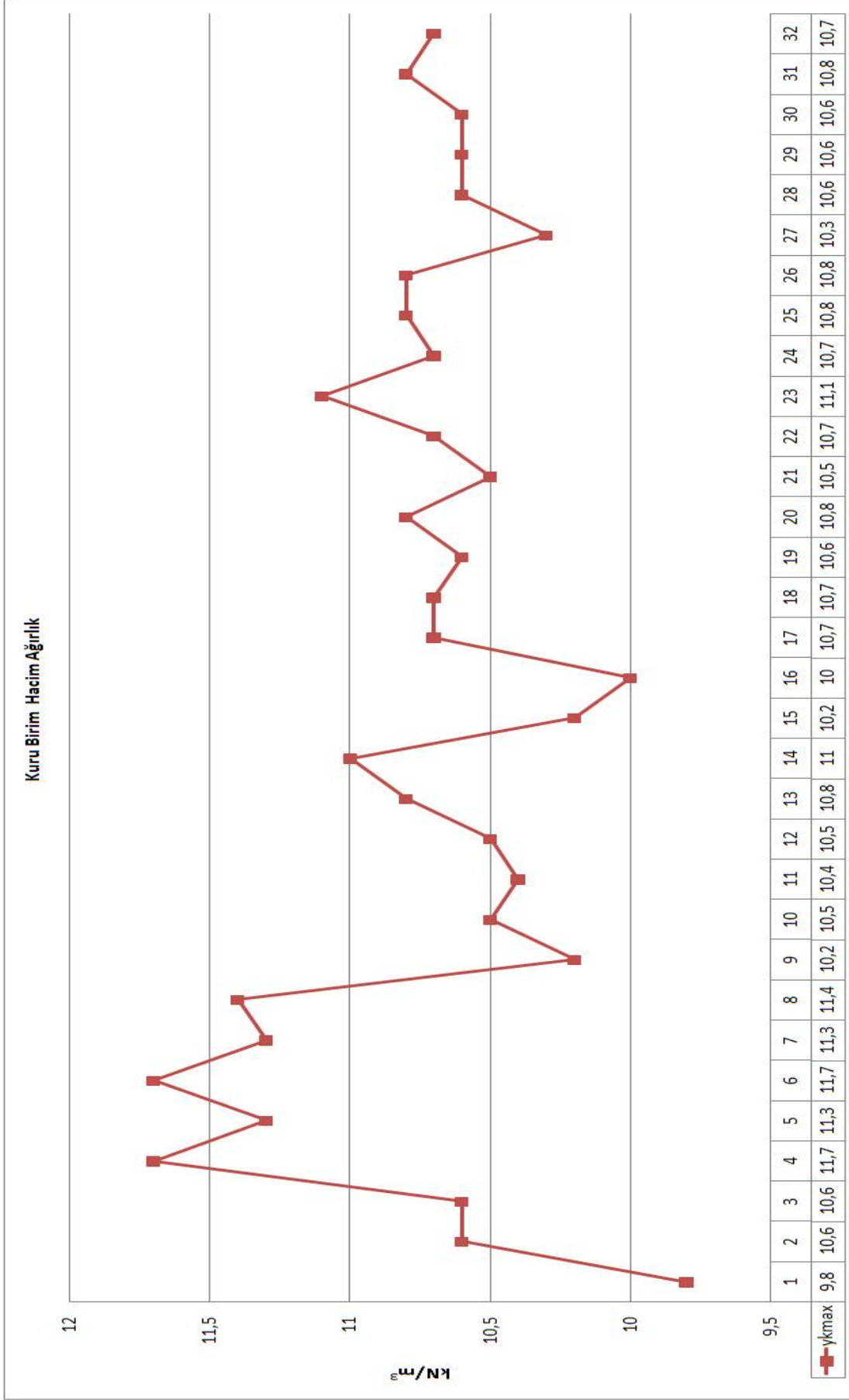
6.4. Karışımların Kompaksiyon Özellikleri

Karışımlar üzerinde yapılan titreşimli kompaksiyon içinde en yüksek kuru birim hacim ağırlık %100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 5 Uçucu Kül ve %100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit + % 15 Uçucu Kül'de elde edilmiştir. %100 Kil+%10 Kireç+% 5, 10, 15, 20, 25 Zeolit katkılarına uçucu kül ilave edildiği zaman işlenebilirliğini arttırdığı gözlenmiştir.

Karışımlardan en düşük optimum su muhtevası ve en yüksek kuru birim hacim ağırlığı değerleri %100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit'e eklenen uçucu kül karışımlarında elde edilmiştir. Karışım oranlarına göre w_{opt} ve γ_{kmax} değişimleri Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'de gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Karışımların Optimum Su Muhtevası Grafiği



Sekil 6.5. Karışımların Kuru Birim Hacim Ağırlık Grafiği

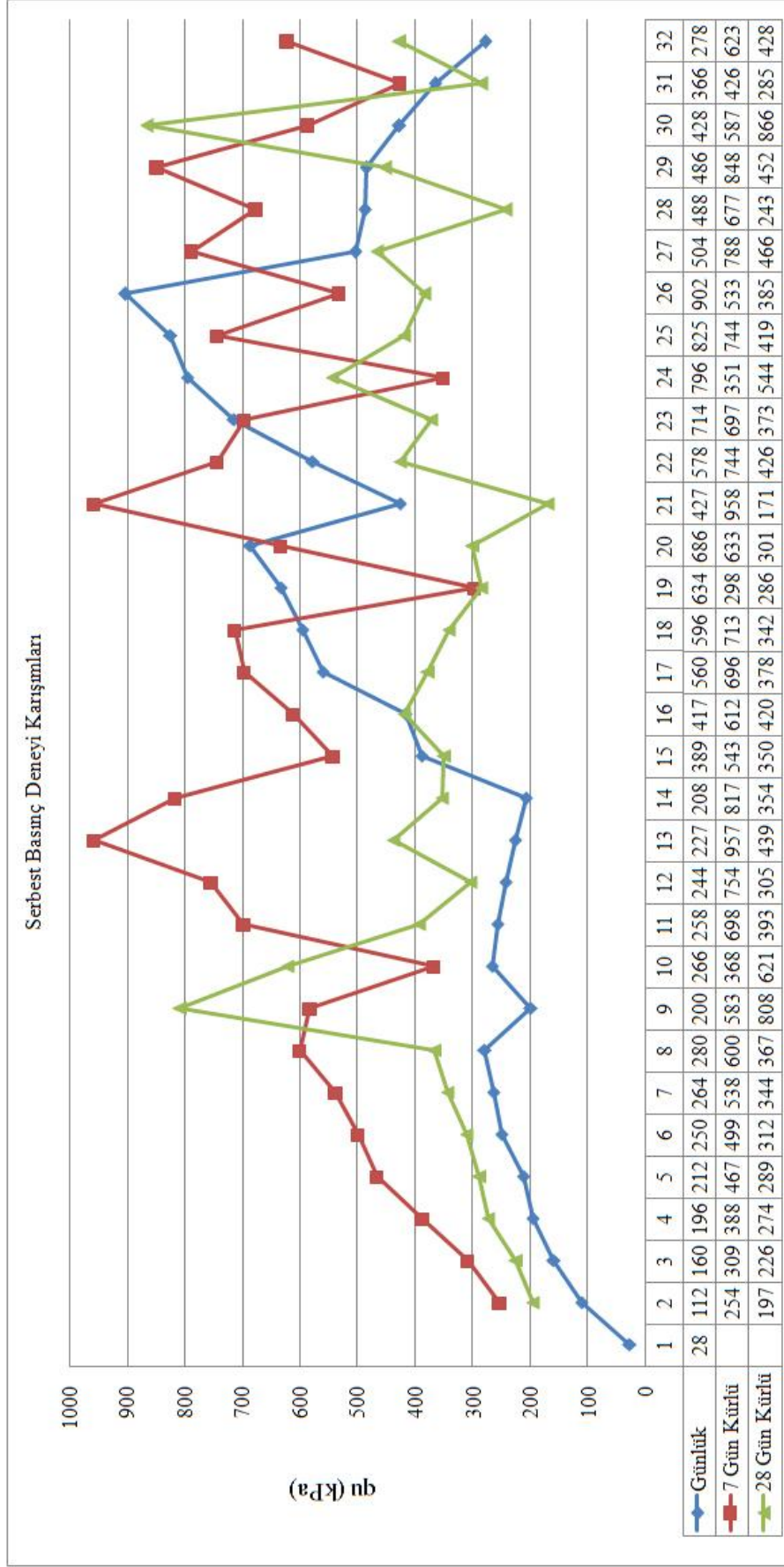
Zeolit katkılı karışımlarda uçucu kül ilave edildikçe optimum su muhtevalarında azalma, kuru birim hacim ağırlığında ise artma görülmüştür.

Zeolit katkılı karışımlarda %10 uçucu kül ilave edildiğinde oluşan optimum su muhtevalarının, uçucu kül miktarı arttırılsa bile fazla değişmediği görülmektedir.

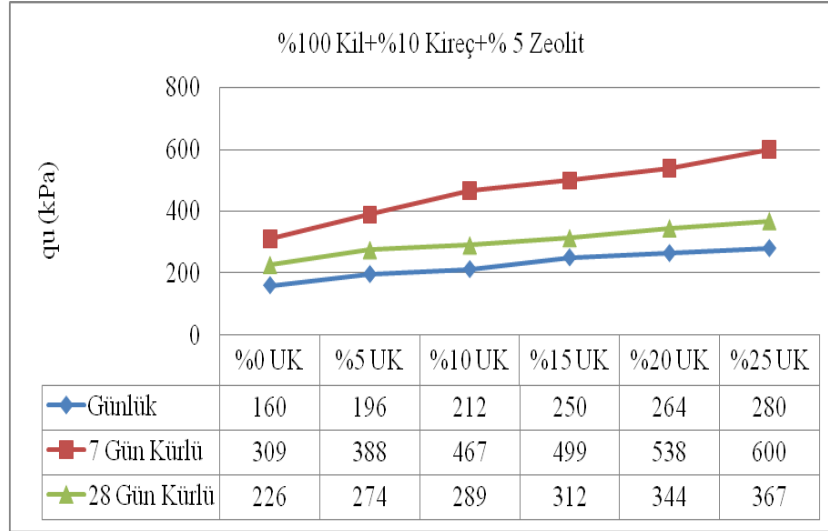
6.5. Karışımların Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

Titreşimli kompaksiyonla sıkıştırılan numuneler özel tüpler içerisine ön arka tarafları mumlanarak bekletilmiştir. Kür günü gelen numuneler de su muhtevası ölçümleri alınarak numuneler içerisinde su kaybının olmadığı anlaşılmıştır.

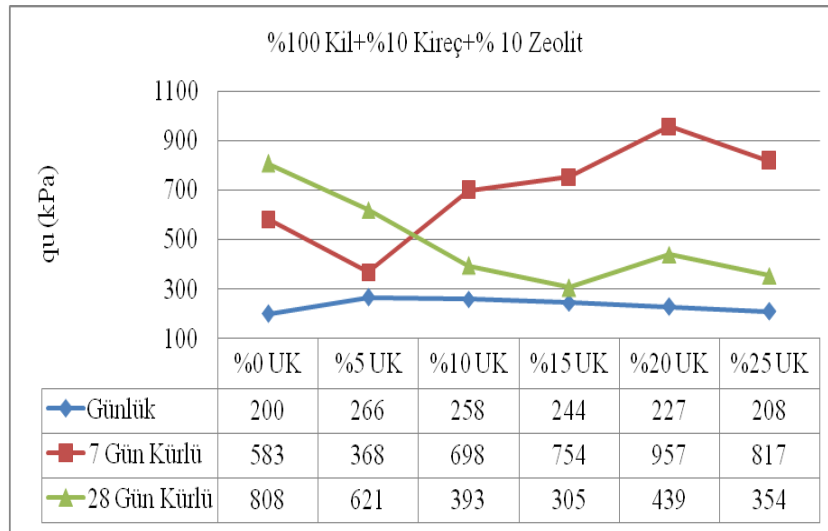
Serbest Basınç deneyi sonunda yapılan hesaplar ve Şekil 6.6'daki grafikten görünen en yüksek mukavemeti 7 günlük kürde bekleyen numuneler göstermiştir.



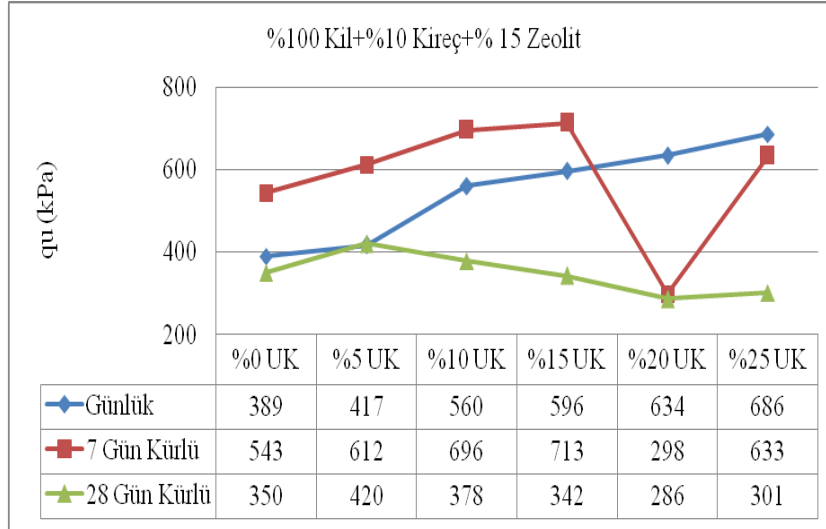
Şekil 6.6. Serbest Basınç Deneyi Günlük, 7 Günlük ve 28 Günlük Kür Deney Grafiği



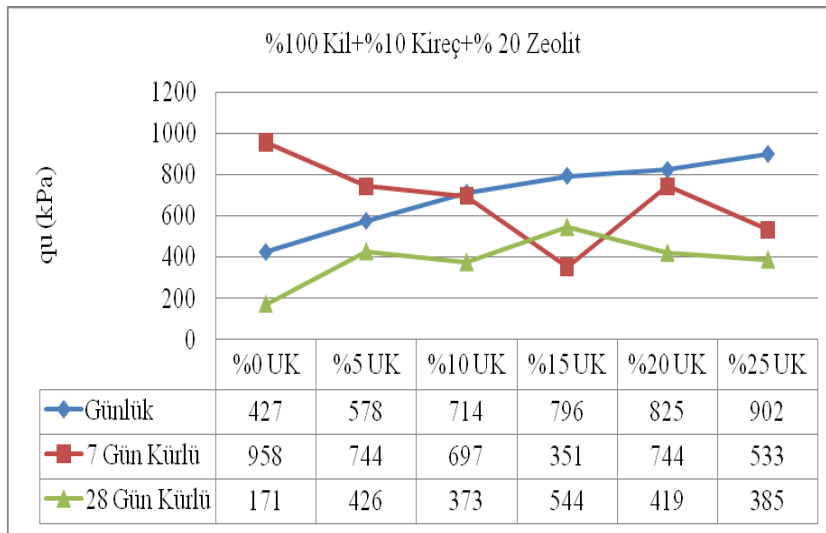
Şekil 6.7. %100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit ve Uçucu Kül İvelili Serbest Basınç Deneyi Grafiği



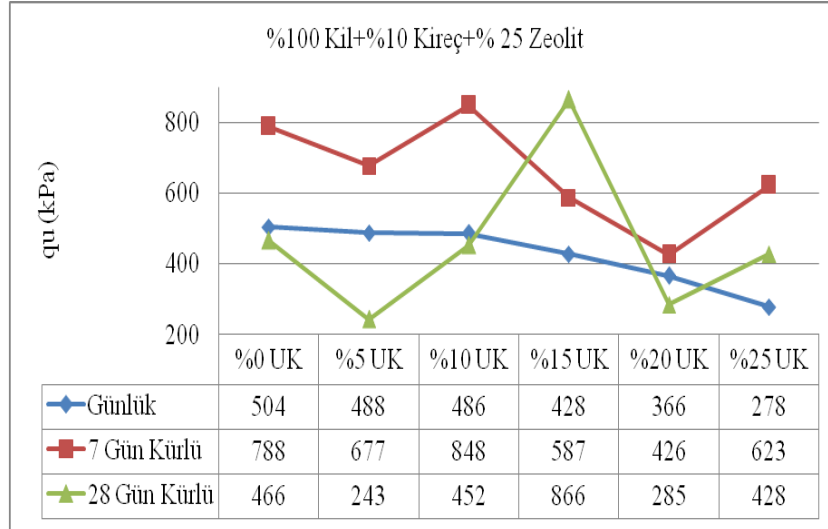
Şekil 6.8. %100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit ve Uçucu Kül İvelili Serbest Basınç Deneyi Grafiği



Şekil 6.9. %100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli Serbest Basınç Deneyi Grafiği



Şekil 6.10. %100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli Serbest Basınç Deneyi Grafiği



Şekil 6.11. %100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli Serbest Basınç Deneyi Grafiği

%5 zeolit katkılı karışımlarda uçucu kül miktarı artırıldıkça serbest basınç dirençlerinin arttığı Şekil 6.7’de verilen grafikten günlük, 7 günlük kür ve 28 günlük kür sonuçlarında gözlenmiştir. %10 zeolit katkılı karışımlarda uçucu kül miktarı artırıldıkça serbest basınç dirençlerinin arttığı Şekil 6.8’de verilen grafikten 7 günlük kür sonuçlarında gözlenmiştir. %15-%20 zeolit katkılı karışımlarda uçucu kül miktarı artırıldıkça serbest basınç dirençlerinin arttığı Şekil 6.9 ve Şekil 6.10’da verilen grafikten günlük sonuçlarında gözlenmiştir. %25 zeolit katkılı karışımlarda uçucu kül miktarı artırıldıkça serbest basınç dirençlerinin azaldığı Şekil 6.11’de verilen grafikten günlük ve 7 günlük kür sonuçlarında gözlenmiştir

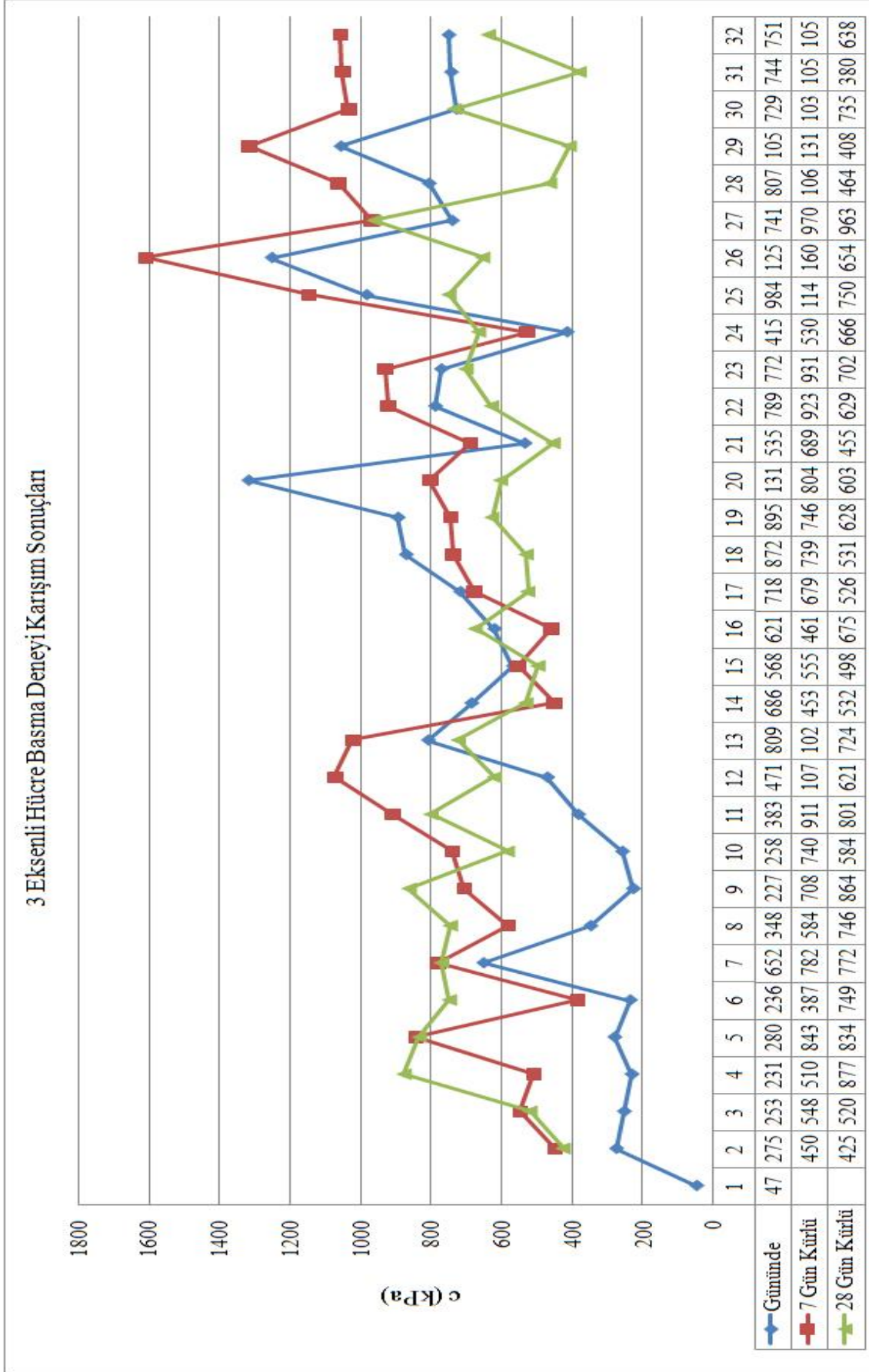
Uçucu kül katsı olmayan karışımlarda zeolit yüzdesi arttıkça günlük serbest basınç değerlerinin arttığı gözlenmiştir.

6.6. Karışımların Üç Eksenli Basınç Deney Sonuçları

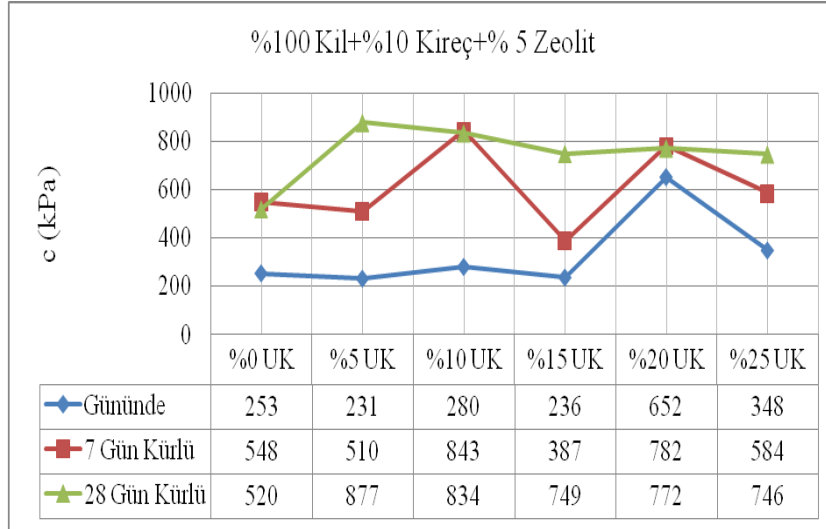
Günlük, 7 ve 28 günlük kür sürelerinde bekletilen karışımlardan maksimum kayma dayanımı 7 gün kürlü %100 Kil+%10 Kireç+%20 Zeolit + %25 Uçucu Kül elde edilmiştir.

Karışımların Şekil 6.12'de verilen günlük ve 7 günlük eğrileri incelendiğinde eğrilerin birbirine paralel yani artış ve azalışların aynı karışım oranlarında olduğu görülmektedir. Benzer değişimlerin 28 günlük kürlü sonuçlarda da gözleneceği tahmin edilmekteydi fakat bu sonuçların günlük ve 7 günlük kür sonuçlarıyla ilişkili olmadığı dikkat çekmektedir. %15-20 ve %25 zeolit katkıli karışımlarda 28 günlük sonuçların diğer sonuçlardan küçük olduğu görülmüştür. 7 günlük kür sonuçları günlük sonuçlardan yüksek çıkmıştır. Fakat bu artış 28 günlük kürdeki numunelerde gözlenmemiştir. Bu da üç eksenli deney sonuçlarına göre kür süresiyle zeminin kayma direncinin ilişkili olmadığını göstermiştir.

Zeolit katkıli zeolitlerin farklı uçucu küllerle olan üç eksenli hücre basınç deney sonuçları Şekil 6.13, Şekil 6.14, Şekil 6.15, Şekil 6.16 ve Şekil 6.17'de verilmiştir.



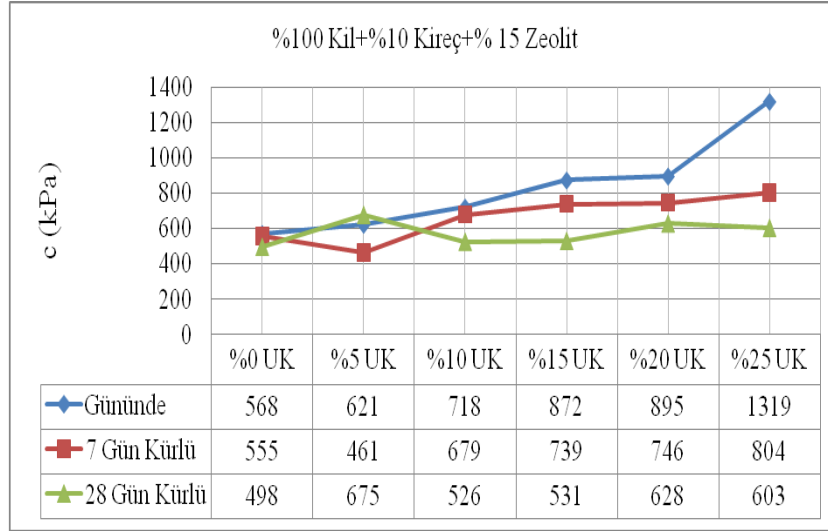
Şekil 6.12. 3 Eksenli Hücre Basma Deneyi Günlük, 7 Günlük ve 28 Günlük Kür Deney Sonuçları



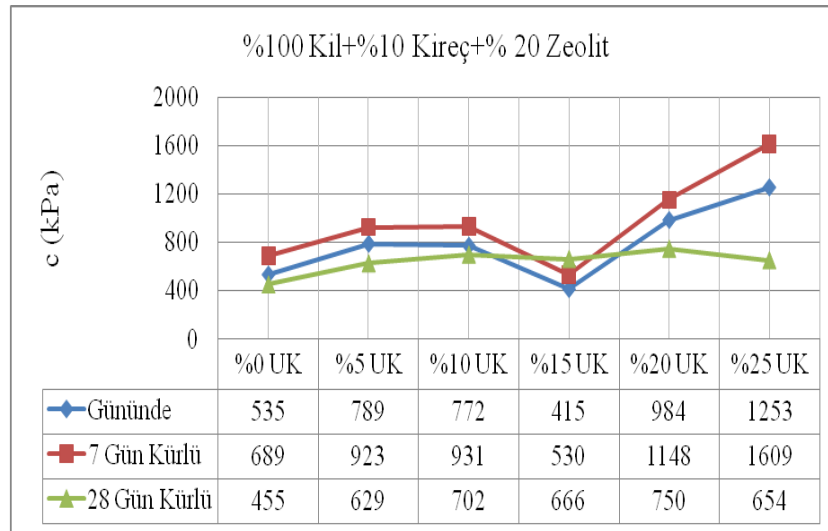
Şekil 6.13. %100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli 3 Eksenli Hücre Basma Deneyi Grafiği



Şekil 6.14. %100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli 3 Eksenli Hücre Basma Deneyi Grafiği



Şekil 6.15. %100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli 3 Eksenli Hücre Basma Deneyi Grafiği



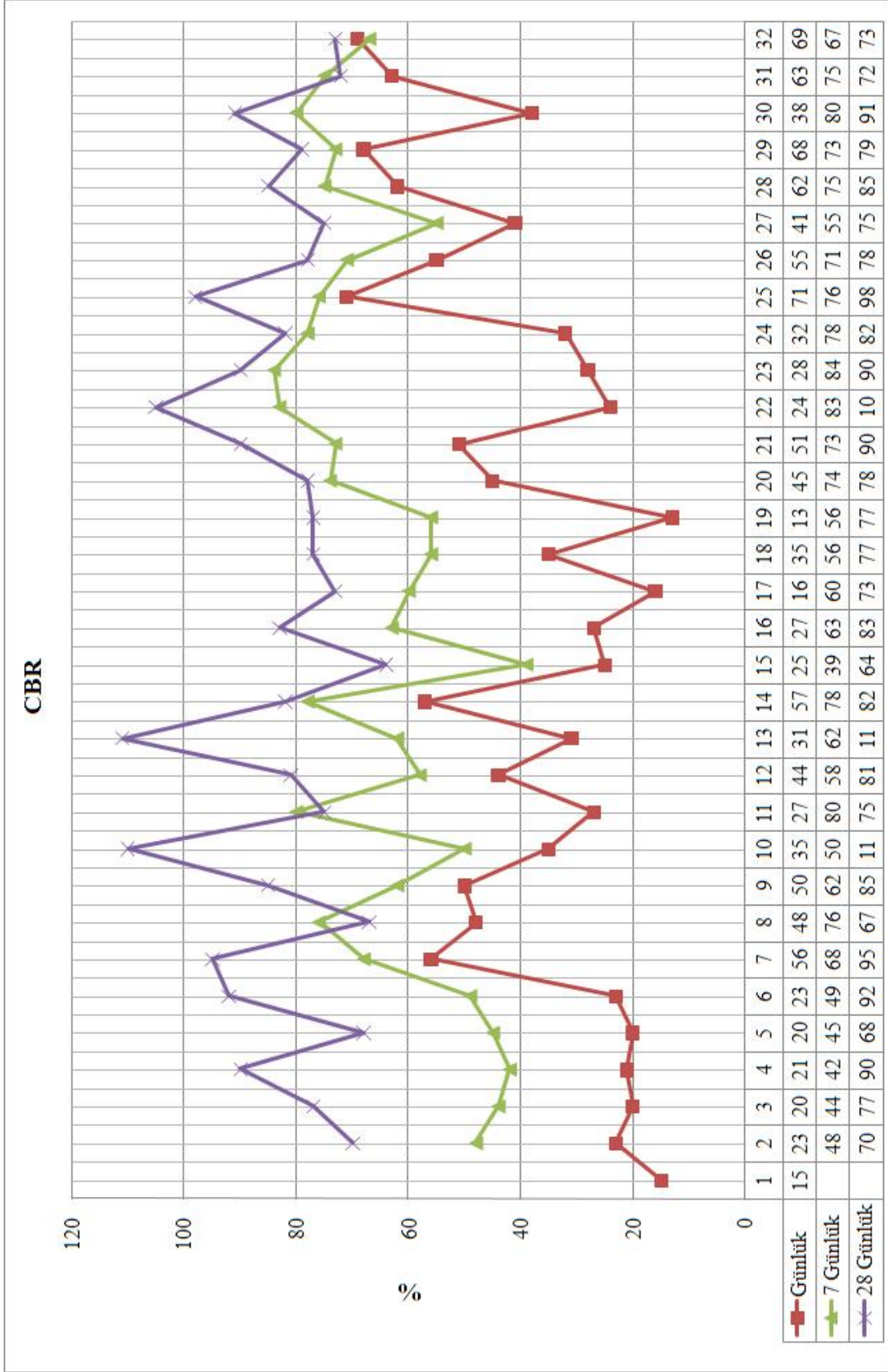
Şekil 6.16. %100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli 3 Eksenli Hücre Basma Deneyi Grafiği



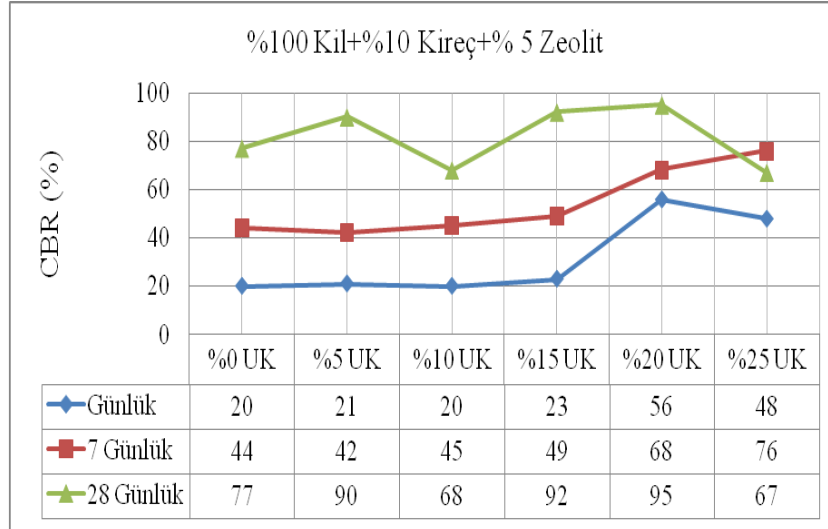
Şekil 6.17. %100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli 3 Eksenli Hücre Basma Deneyi Grafiği

6.7. Karışımların Taşıma Oranları (CBR)

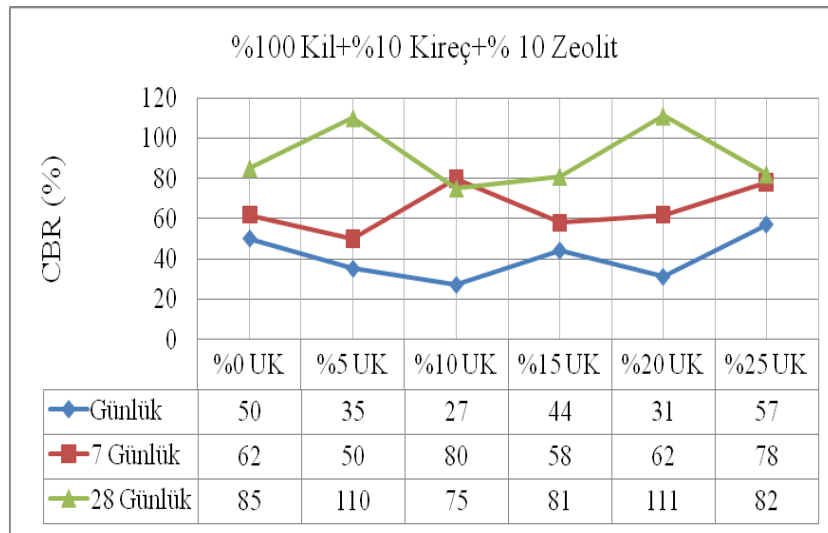
CBR sonuçları değerlendirildiğinde ilk göze çarpan nokta kür sürelerine bağlı olarak taşıma gücü oranlarının artışı şekil 6.18’de gösterilmiştir. Her üç eğrinin de büyük ölçüde birbirine paralellikleri şekil 19-23’de gözlemlenmiştir. %25 zeolit katkılı karışımlarda her üç durumdaki taşıma gücü oranı değerleri birbirine yakın çıkmıştır.



Şekil 6.18. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi Grafiği



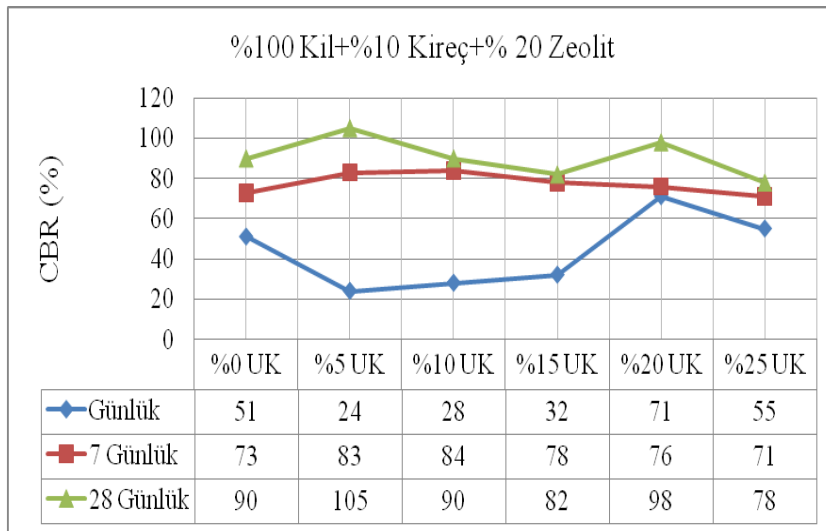
Şekil 6.19. %100 Kil+%10 Kireç+% 5 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli CBR Deneyi Grafiği



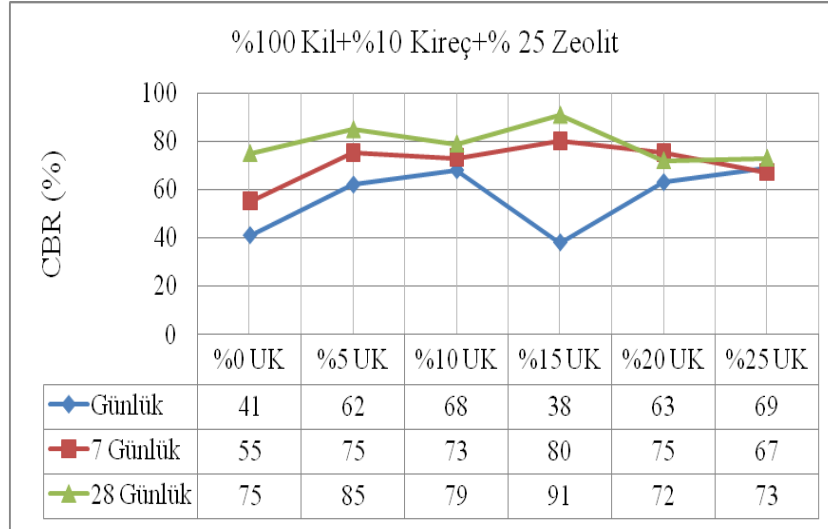
Şekil 6.20. %100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli CBR Deneyi Grafiği



Şekil 6.21. %100 Kıl+%10 Kireç+% 15 Zeolit ve Uçucu Kül İlevli CBR Deneyi Grafiği



Şekil 6.22. %100 Kıl+%10 Kireç+% 20 Zeolit ve Uçucu Kül İlevli CBR Deneyi Grafiği

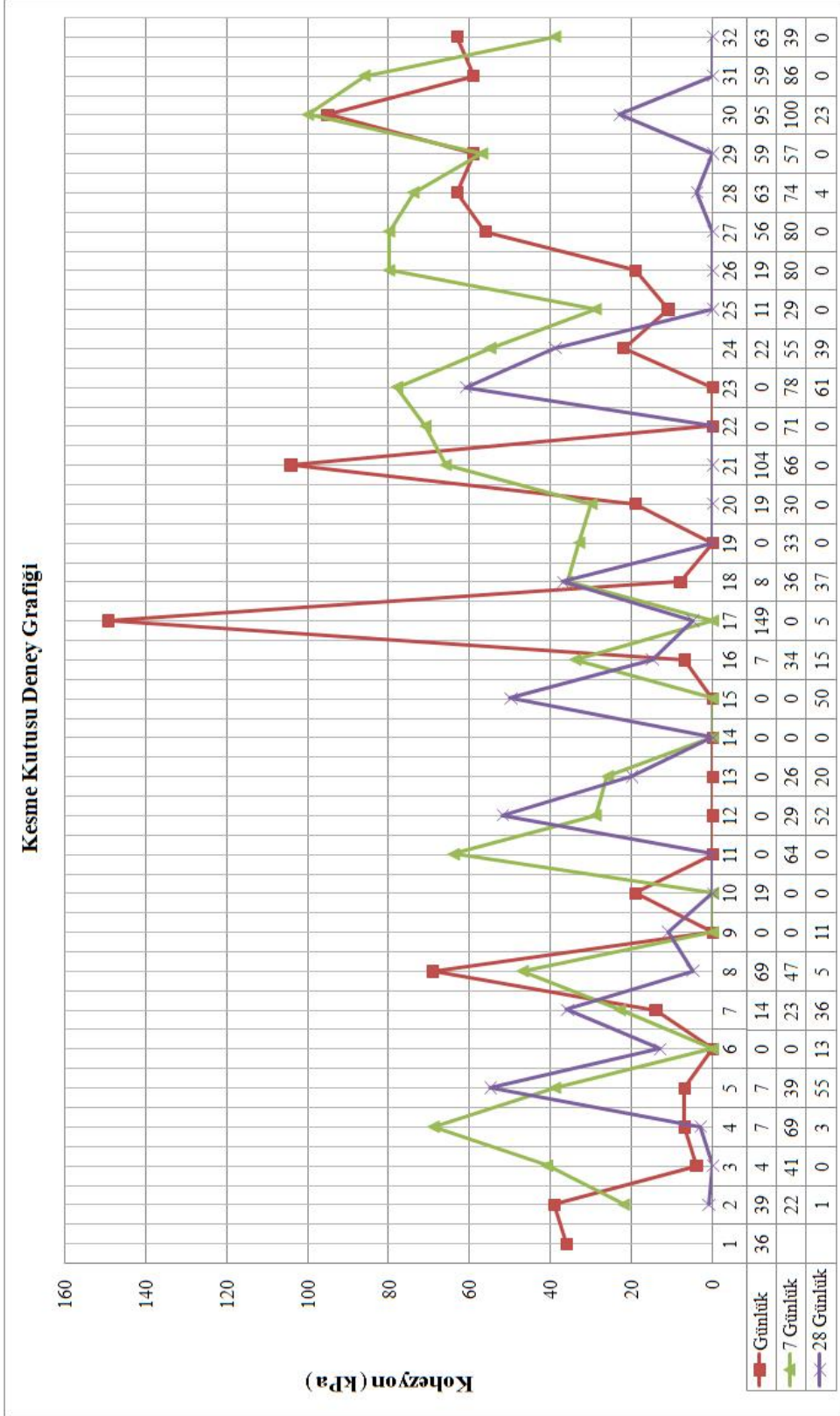


Şekil 6.23. %100 Kil+%10 Kireç+% 20 Zeolit ve Uçucu Kül İlaveli CBR Deneyi Grafiği

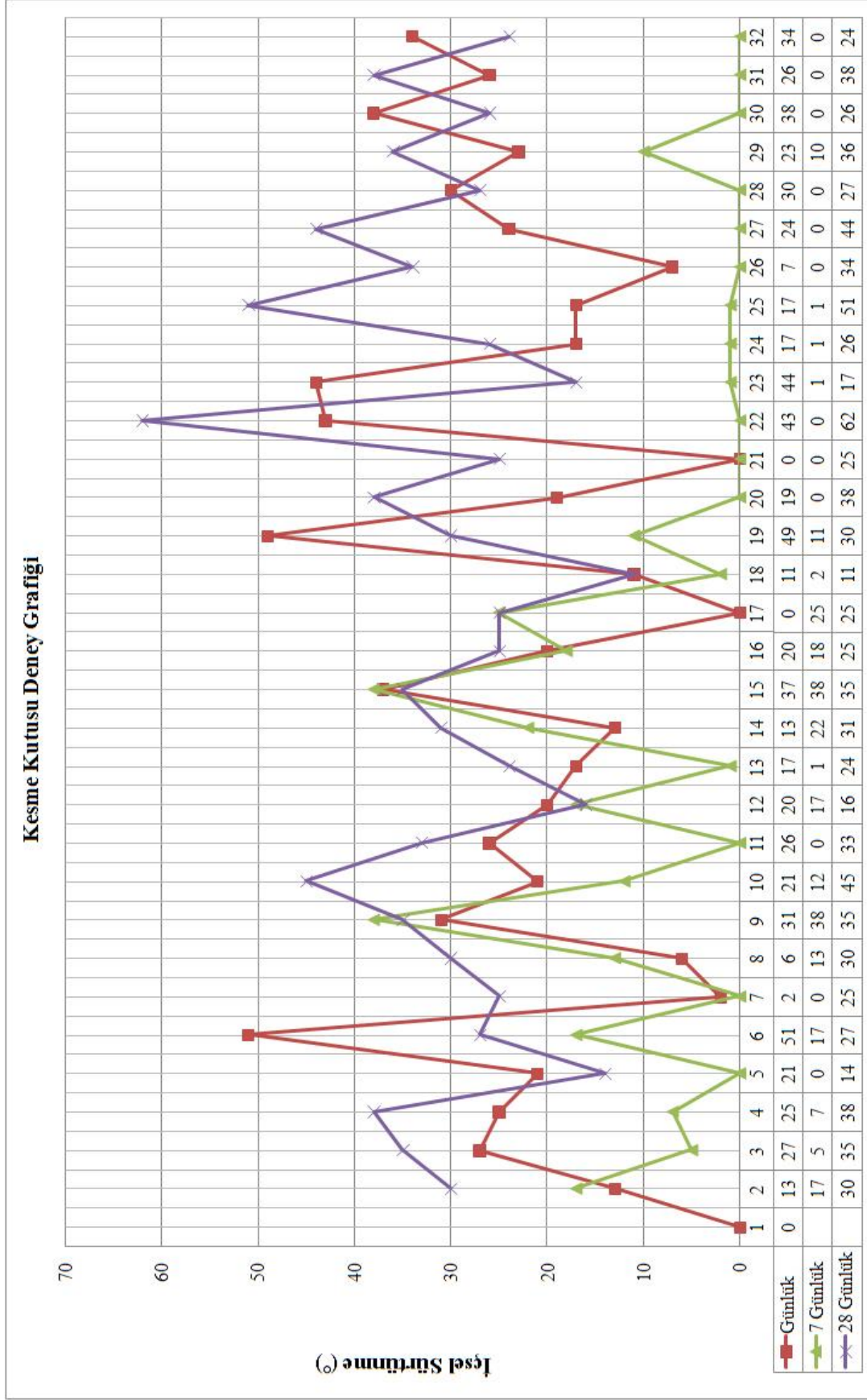
6.8. Karışımların Kesme Kutusu Deneyi Sonuçları

Kesme kutusu sonuçları incelendiğinde artışların bir düzen içinde olmadığı görülmektedir. Bu nedenle sonuçların doğru olarak değerlendirilmesi çok güç görülmektedir. Ancak %5-10 ve %20 zeolit karışımlarında 28 günlük kür sonuçlarının diğerlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Kesme kutusu deneyleri sonucu zeolitlere katılan farklı oranlardaki uçucu kül oranlarına göre elde edilen c ve ϕ değerleri günlük, 7 günlük ve 28 günlük kür sonuçlarına göre Şekil 6.24 ve Şekil 6.25’de verilmiştir.



Şekil 6.24. Karşımların Kesme Kutusu Deneýi Kohezyon Grafiđi



Şekil 6.25 . Karışımların Kesme Kutusu Deneysel İşel Sürütme Grafığı

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada zemin olarak bentonit kili kullanılmıştır. Bu kil içerisine %10 kireç ve değişik oranlarda uçucu kül, zeolit katılmış ve bu karışımlara günlük, 7 günlük ve 28 günlük kür süreleri uygulanmıştır. Bu stabilizasyondan sonra karışımlar üzerinde deneyler yapılmış ve zemin stabilizasyonu üzerine etkileri belirlenmiştir.

Karışımların belirlenen kıvam limitlerine göre katkı oranları arttırıldıkça plastisite indisleri azalmıştır.

Hidrometre analizi sonucunda zemine katılan katkı maddesi oranları arttıkça silt oranı artmış, kil oranları azalmıştır. %100 Kil+%10 Kireç+% 10 Zeolit + % 10 Uçucu Kül ile %100 Kil+%10 Kireç+% 15 Zeolit karışımında yükselme görülmüştür.

Özgül Ağırlık Deneyinde zeolitlere katılan %10 ve %20 uçucu küllerde özgül ağırlık değerinde yükselme görülmüştür.

Kompaksiyon deneyinden elde edilen en düşük optimum su muhtevası %5 zeolite katılan uçucu küllerde görülmüştür. Zeolit katkılı karışımlarda %10 uçucu kül ilave edildiğinde, oluşan optimum su muhtevaları uçucu kül miktarı arttırılsa bile değişmediği görülmektedir.

Serbest Basınç Deneyinde en yüksek mukavemet değeri günlük, 7 günlük ve 28 günlük kürde bekleyen numunelerde %10 zeolit ve %25 zeolite katılan %15 uçucu kül numunesinde görülmüştür.

Üç Eksenli Hücre Basınç Deneyinde en yüksek mukavemet %5 zeolit karışımolu uçucu küllerde görülmüştür.

CBR deney sonuçlarında bentonit kiline katılan her katkının mukavemeti arttırdığı gözlenmiştir. Günlük, 7 günlük ve 28 günlük kürde bekletilen deney numunelerinde %100 mukavemetini artıran %5 zeolite katılan %5 uçucu külden görülmüştür.

Bentonit kiline ilave edilen %5 zeolitlere katılan uçucu küllerde istikrarlı olarak mukavemette artış, %10-15-20-25 zeolitlere katılan uçucu küllerde de süreksizlik tespit edilmiştir.

Çalışma kapsamında %100 Kil + %10 Kireç + %5 Zeolit + %5 Uçucu Kül katkılı karışımların stabilite edilecek zeminlerde temel tabakası olarak kullanılabilmesi belirlenmiştir.

Çalışmanın daha fazla sayıda deneyler, kür süresi ve katkı oranlarının değiştirilerek detaylı araştırılması önerilmektedir.

Bu çalışmada sonuç olarak zeolit ve uçucu külün, yüksek plastisiteli zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilmesi ve böylece kül atığının Türkiye ekonomisine katkı sağlayacağı ve çevre kirliliğini azaltacağı tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] CÖMERT A.T., Uçucu Küllerin Zemin Stabilizasyona Etkileri, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ,Yüksek Lisans Tezi,1-43 S., Sakarya, 2005
- [2] ALKAYA D., ERKEN A., ALYANAK T., INANÇLI G., Uçucu Küllerin Toprak Sanayinde Kullanılabilirliği, Uluslararası Pişmiş Toprak Sempozyumu, Tepebaşı Belediyesi, 287-295 S. , Eskişehir, 2002
- [3] ERŞAN, H.,Uçucu Küllerin Siltli Zeminlerin Kayma Mukavemeti Üzerine Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ,Yüksek Lisans Tezi,75 S.,İstanbul,1996
- [4] TSONIS P., CHRISTOULAS,S.,KOLIAS,S., Soil Improvement With Coal Ash In Road Construction, 964 S.,Helsinki, 1983
- [5] SAVRAN K.Z. Stabilization Of Cohesive Soils With Fly Ash, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü , Yüksek Lisans Tezi, 62 S.,Ankara,1988
- [6] JOSHI R.C., ve NAGARAJ T.S., Fly Ash Utilization For Soil Improvement Environmental Geotechnics And Problematic Soils And Rocks. ,Balkema Publication, 15-25 S., 1986
- [7] WASTİ Y., Uçucu Küllerin Geoteknik Uygulamalarda Kullanımı, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu,Bildiriler, 37-44 S., 1993
- [8] INDRANATRA B., NUTALAYA P.KOO,K.S AND KUGANENTHIRA N. Engineering Behavior Of A Low Carbon Puzzolonic Fly Ash And Its Potential As A Construction Fill., Canada Geotechnic Journal 28,542-555 S., 1991
- [9] ÇAKIR M. , Uçucu Kul ile Zemin Stabilizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 1999
- [10] ÖNALP A., Geoteknik Bilgisi Cilt 2, KTÜ Basımevi,Trabzon 1997
- [11] BALTA İ., Doğu Karadeniz Bölgesi Topraklarının Çimento ve Kireçle Stabilizasyonu, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Trabzon, 1984

- [12] HAUSMAN MR, Engineering Principles of Ground Modification International Edition, 632 S.Singapore,1990
- [13] INGLESS O., AND METCALF J.B. Soil Stabilization Principles And Practice Butterworth's 374 S., Sidney,1972
- [14] MITCHELL J.K., Soil Improvement (State Of The Art Report) X.Soil Mech.And Foundation Eng.Conferans ,Stochkolm,1981
- [15] IMPE W., Soil Improvement Techniques And Their Evolution, Aa Balkema Rotterdam 124 S. 1989
- [16] KAVAK A., The Behavior Of Lime Stabilized Clays Under Cyclic Loading Boğaziçi Üniveristesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi 167 S., İstanbul 1996
- [17] ERDEM E., DONAT., R. Ve ÇETİSLİ H., Hydration And Mechanical Properties Of Cement Containing Zeolite, Cement, Concrete Word,No:17, 22-28 S., Ankara 1999
- [18] ATANUR A., Kireç Stabilizasyonu ve Yol Yapımındaki Tatbikatı, Bayındırlık Bak. Kgm Yayınları,180 S., Ankara, 1973
- [19] EİE, Türkiye uçucu küllerinin özellikleri ve kullanım özellikleri, EİE genel yayın direktörlüğü, Ankara, 1979
- [20] ERDİNÇ M. Uçucu Küllü Betonlarda Dayanım Ve Klor Geçirimsizliği, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 100 S., İstanbul, 1995
- [21] ALKAYA D., Uçucu Kül Katkısının Dolgu Zeminlerin Stabilitesine Etkisi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Denizli, 2002
- [22] NICHOLSON P.O AND KASHYAP V. fly ash stabilization of tropic Hawaiian soils fly ash for soil improvement geotechnical special publication no:36, 15-30 S., ed.sahrp kd. ASCE Newyork 1993
- [23] RAYMONDS AND SMITH P.H , Shear Strength Settlement And Compaction Charcteisitici Of Pulverized Fly Ash Civil Nginering And Public Works Rewiw London vol.61, 1107-1113 S., 1966
- [24] TS 639 Uçucu Küller, TSE, Ankara, 1998
- [25] TS EN 459-1 Yapı kireci - Bölüm 1: Tarifler, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri , TSE, Ankara, 2005
- [26] DAMUR, Ann Mines, 17, 191 S., 1840

- [27] EICHORN, H., Poggendorf Ann Phys Chem., 126 S., 1858
- [28] WEIGEL O., STEINHOF E., AND KRISTALLOGR Z.,25 S., 1925
- [29] MC.BAIN, The Sorption Of Gases And Vapors By Solid, 1 S., Rutledge And Sons London ,1932
- [30] SARIIZ K. ve NUHOĞLU İ., Endüstriyel Hammadde Yatakları Ve Madenciliği, Anadolu Üniversitesi, Yayın No:636, Eskişehir, 1992
- [31] CANPOLAT F., Çimento Performansının Geliştirilmesinde Doğal Zeolitin Endüstriyel Atıklarla Birlikte Çimento Üretiminde Kullanılması, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Sakarya 2002
- [32] MUMPTON, F. A., Industrial Mine, 1973
- [33] İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, TSE, Ankara, 2006
- [34] AYTEKİN M., Deneysel Zemin Mekaniği, Akademi Yayın Evi, Trabzon, 2000
- [35] TS 1500 İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, TSE, Ankara, 2000
- [36] İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini, TSE, Ankara, 2006

ÖZGEÇMİŞ

İbrahim ÇAKILCIOĞLU, 6 Temmuz 1979 tarihinde Samsun'da doğdu. 1998 yılında Samsun Atakum Teknik Lisesi Alt-Yapı Bölümünden mezun oldu. 1998 yılında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümüne girdi. 2003 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi bölümüne Yüksek Lisans öğrencisi olarak kayıt yaptırdı.