

168014

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

# UÇUCU KÜLLERİN ZEMİN STABİLİZASYONUNA ETKİLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Tuna CÖMERT

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

HAZİRAN 2005

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UÇUCU KÜLLERİN ZEMİN STABİLİZASYONUNA  
ETKİLERİ

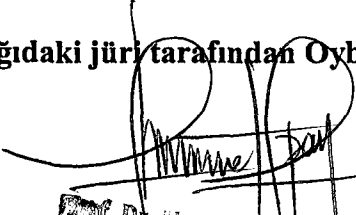
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Tuna CÖMERT

Enstitü Anabilim Dalı : Yapı Eğitimi  
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Seyhan FIRAT

Bu tez 16/6/2005 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirligi ile kabul edilmiştir.

  
Yrd. Doç. Dr. Seyhan FIRAT  
Jüri Başkanı

  
Doç. Dr. Ahmet Tuna CÖMERT  
Jüri Üyesi

  
Yrd. Doç. Dr. Hakan Kayıncı  
Jüri Üyesi

## **TEŞEKKÜR**

Çalıőmalarım aşamasında her türlü desteği sunan, bilgi ve birikimlerini paylaőan Sayın Yrd. Doç. Dr. Seyhan Fırat'a, Yrd. Doç. Dr. Hakan Koyuncu'ya, Yrd. Doç. Dr. Zakir Poyraz'a ve Tekniker Hüseyin Temel'e teşekkür ederim.

Malzeme konusundaki katkılarından dolayı Matel Madencilik A.Ő. ve Orhaneli Termik Santral idaresine, desteğiyle bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük pay sahibi olan eőim ve çocuklarıma teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xii
SUMMARY .....	xiii

### BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	1
-------------	---

### BÖLÜM 2.

UÇUCU KÜL İLE YAPILMIŞ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	5
--	---

### BÖLÜM 3.

#### KİMYASAL STABİLİZASYON VE STABİLİZASYON KONTROL

YÖNTEMLERİ.....	8
3.1 Kimyasal Stabilizasyon Yöntemleri.....	10
3.1.1 Enjeksiyon teknikleri.....	11
3.1.1.1 Daneli enjeksiyon .....	11
3.1.1.2 Kimyasal karışım enjeksiyonu.....	12
3.1.1.3 Jet enjeksiyonu.....	12
3.1.2 Katkı maddeleri ile stabilizasyon .....	12
3.2 Stabilizasyonun Kontrol Yöntemleri.....	14
3.2.1 Laboratuvar deney teknikleri.....	15
3.2.2 Arazi deney teknikleri .....	15
3.2.2 Jeofizik deney teknikleri .....	16

## BÖLÜM 4.

KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ .....	18
4.1 Kil (Mask 1) .....	18
4.2 Uçucu Kül .....	20
4.3 Kireç.....	26

## BÖLÜM 5.

YAPILAN DENEYLER VE UYGULANAN METOTLAR .....	29
5.1 Özgül Ağırlık .....	30
5.2 Likit ve Plastik Limit Deneyi.....	31
5.3 Dane Çapı Dağılımı ve Zemin Sınıflandırması.....	33
5.3.1 Elek analizi (ıslak eleme) .....	33
5.3.2 Hidrometre deneyi.....	34
5.3.3 Zemin sınıflandırması .....	36
5.4 Ateşte Kayıp Miktarı (Kızdırma Kaybı) .....	36
5.5 Serbest Basınç Deneyi .....	37
5.6 Üç Eksenli UU Deneyi.....	38
5.7 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR).....	40
5.8 Kompaksiyon Deneyi.....	40
5.9 Sabit Seviyeli Permeabilite .....	41

## BÖLÜM 6.

DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME .....	43
6.1 Karışımların Dane Çapı Dağılımı .....	43
6.2 Karışımların Kıvam Limitleri .....	46
6.2.1 Aktivite.....	47
6.3 Karışımların Zemin Sınıflandırmaları.....	48
6.4 Karışımların Fiziksel Özellikleri.....	49
6.5 Karışımların Kompaksiyon Özellikleri.....	50
6.6 Karışımların Serbest Basınç Deneyi Sonuçları .....	51
6.7 Karışımların Üç Eksenli Basınç Deney Sonuçları .....	54
6.8 Karışımların Taşıma Oranları (CBR).....	55
6.9 Karışımların Permeabilite Katsayıları (k) .....	59

BÖLÜM 7.

SONUÇ VE ÖNERİLER..... 60

KAYNAKLAR ..... 63

ÖZGEÇMİŞ ..... 66



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

### Simgeler

$w_L$	: Likit limit değeri (%)
$w_p$	: Plastik limit değeri(%)
$I_p$	: Plastisite indisi değeri(%)
$w_1$	: Kap ağırlığı (kN)
$w_2$	: Kap+ıslak numune ağırlığı (kN)
$w_3$	: Kap+kuru numune ağırlığı (kN)
$W_1$	: Piknometre ağırlığı (kN)
$W_2$	: Piknometre+numune ağırlığı (kN)
$W_3$	: Piknometre+numune+su ağırlığı (kN)
$W_4$	: Piknometre+ su ağırlığı (kN)
$w_0$	: 550°C sonucu ölçülen ağırlık (kN)
$w_S$	: 110°C sonucu ölçülen ağırlık (kN)
$W_k$	: Ateşte kayıp miktarı (%)
$\Delta H$	: Düşey boy değişimi (mm)
$H_0$	: İlk boy (cm)
$\gamma_k$	: Kuru birim hacim ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	: Gerilme (kPa)
$\varepsilon$	: Birim boy değiştirme ( $\Delta H/H_0$ )
$\rho_w, \rho_L$	: Suyun özgül ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )
$G_s$	: Özgül ağırlık
$A$	: Numune kesit alanı (cm <sup>2</sup> )
$k$	: Permeabilite katsayısı (m/sn)
$A_c$	: Aktivite

### Kısaltmalar

UK	: Uçucu kül
M1	: Mask1 kili
KK	: Kalsiyum kireci (söndürülmüş)
5KK	: %100 Mask1 kili+%5 kalsiyum kireci
5UK	: %100 Mask1 kili+%5 kalsiyum kireci %5 uçucu kül
10UK	: %100 Mask1 kili+%5 kalsiyum kireci %10 uçucu kül
15UK	: %100 Mask1 kili+%5 kalsiyum kireci %15 uçucu kül
S-KK 80	: Söndürülmüş kalsiyum kireci

TS	: Türk standartları
TSE	: Türk standartları enstitüsü
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı
OSM	: Optimum su muhtevası (%)
UU	: Konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli kesme deneyi
BMYO	: Bilecik Meslek Yüksekokulu
AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolları ve Ulaştırma Daireleri Birliği
ASTM	: Amerikan standartları
PL	: Plastik limit
LL	: Likit limit
İp	: Plastisite indisi
µm	: Mikron metre
Å	: Angstrom





## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 4.1	Kullanılan malzemelerin hidrometre eğrileri.....	28
Şekil 4.2	Kullanılan malzemelerin kil içerikleri .....	28
Şekil 5.1	Hidrometre deney düzeneği .....	34
Şekil 5.2	M1 kili dane dağılımı.....	35
Şekil 5.3	Üçeksenli deneyde numune yerleştirme .....	38
Şekil 5.4	Üçeksenli deney hücresi .....	39
Şekil 5.5	CBR deneyi.....	40
Şekil 6.1	M1 kiline ait hidrometre analizi.....	44
Şekil 6.2	5KK karışımı için hidrometre analizi .....	44
Şekil 6.3	5UK karışımı için hidrometre analizi .....	45
Şekil 6.4	10UK karışımı için hidrometre analizi .....	45
Şekil 6.5	15UK karışımı için hidrometre analizi .....	46
Şekil 6.6	Karışımların kil yüzdeleri ve plastisite indisi (Ip) arasındaki ilişki.....	47
Şekil 6.7	Stabilize sonrası karışımların plastisite kartındaki yerleri .....	49
Şekil 6.8	Karışımların optimum su muhtevaları .....	50
Şekil 6.9	Karışımların maksimum kuru birim ağırlıkları.....	51
Şekil 6.10	Serbest basınç deneyinden sonra 10UK'da çatlama .....	51
Şekil 6.11	Serbest basınç deneyinden sonra 15UK'da çatlama .....	52
Şekil 6.12	10UK'nın serbest basınç deneyinde kayma dayanımı .....	52
Şekil 6.13	10UK'nın serbest basınç deneyinde eksenel birim boy kısalması.....	53
Şekil 6.14	28 gün kürlü karışımların serbest basınç kayma dayanımları.....	53
Şekil 6.15	28 gün kürlü 10UK'nın üçeksenli basınç deneyinde kayma dayanımı....	54
Şekil 6.16	28 gün kürlü 10UK'nın üçeksenli basınç deneyinde eksenel birim boy kısalmaları.....	54
Şekil 6.17	Karışımların çeşitli kür sürelerinde, üçeksenli basınç deneyinde maksimum kayma dayanımları .....	55
Şekil 6.18	M1 kili için CBR grafiği .....	56

Şekil 6.19 5KK karışımı için CBR grafiği.....	56
Şekil 6.20 5UK karışımı için CBR grafiği.....	57
Şekil 6.21 10UK karışımı için CBR grafiği.....	57
Şekil 6.22 15UK karışımı için CBR grafiği.....	58
Şekil 6.23 Islak ve kuru durumdaki karışımların maksimum CBR değerleri.....	58
Şekil 6.24 Permeabilite katsayıları.....	59



## TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1 İnorganik ve organik katkı maddelerinin karşılaştırılması. ....	13
Tablo 4.1 Mask 1 (M1) kilinin dane çapı dağılımı .....	18
Tablo 4.2 Mask 1 (M1) kilinin mineral içeriği .....	19
Tablo 4.3 Mask 1 (M1) kilinin kimyasal bileşimi.....	19
Tablo 4.4 Mask 1 (M1) kilinin geoteknik özellikleri.....	20
Tablo 4.5 Uçucu külleri sınıflandırma sistemi.....	23
Tablo 4.6 Uçucu külün kimyasal analiz sonuçları ve değerlendirilmesi .....	24
Tablo 4.7 Uçucu külün incelik tayini.....	25
Tablo 4.8 Uçucu külün çeşitli yaşlarda (kür süresinde) aktivite endeksi ve puzolanik aktivitesi .....	25
Tablo 4.9 Uçucu külün indeks özellikleri .....	26
Tablo 4.10 Uçucu külün ıslak eleme ve hidrometre sonucu dane dağılımı .....	26
Tablo 4.11 Kalsiyum kirecinin bileşimi (TS 4022) .....	27
Tablo 4.12 Kalsiyum kirecinin indeks özellikleri .....	27
Tablo 4.13 Kalsiyum kireci ıslak eleme ve hidrometre sonucu dane dağılımı .....	27
Tablo 5.1 Setler ve kullanılan katkı oranları.....	29
Tablo 5.2 Karışımların özgül ağırlıkları .....	31
Tablo 5.3 Karışımların kıvam limitleri ve plastisite indisleri .....	33
Tablo 5.4 Islak eleme deney sonuçları.....	33
Tablo 5.5 Hidrometre deney sonuçları.....	35
Tablo 5.6 Karışımların zemin sınıfları .....	36
Tablo 5.7 Karışımların ateşte kayıp miktarı.....	37
Tablo 5.8 Karışımların serbest basınç deneyi sonucu kayma dayanımları .....	37
Tablo 5.9 Karışımların üçeksenli deney, maksimum kayma dayanımları (qu) değerleri.....	39
Tablo 5.10 Karışımların ıslak ve kuru maksimum CBR değerleri.....	41

Tablo 5.11 Karışımların optimum su muhtevası ve kuru birim ağırlıkları .....	41
Tablo 5.12 Karışımların permeabilite katsayısı (m/sn).....	42
Tablo 6.1 Karışımların dane çapı dağılımı.....	46
Tablo 6.2 Karışımların aktivitesi.....	48



## ÖZET

Anahtar Kelimeler: Stabilizasyon, Uçucu Kül, Kireç, Üç Eksenli Deney, İndeks Özellikleri

Stabilizasyon mekanik, fiziksel ve kimyasal yöntemler içerir. Bu yöntemler zemin veya atık maddelerin dayanımını artırır. Katkı maddeleriyle yapılan iyileştirme, stabilizasyon yöntemleri içinde kimyasal stabilizasyon olarak da bilinmekte ve iki yönden fayda sağlamaktadır; birincisi, bu yöntemle zeminin dayanımını artırılır, ikincisi, eğer katkı olarak kullanılacak madde endüstriyel bir atık ise bu çevreye zarar vermeden kullanımı sağlanmış olur.

Türkiye'nin 10 milyar ton kömür rezervi bulunmaktadır ve termik santrallerde her yıl 55 milyon tonu yakılmaktadır. Yakma sonucunda 13 milyon ton uçucu kül ortaya çıkmakta ve kül barajlarında depolanmaktadır. Bu uçucu küllerin meydana getirdiği çevre kirliliğinin önlenmesi ve yeniden kullanımının sağlanması daha da önemli hale gelmektedir.

Bu çalışmada kireç ve Orhaneli uçucu külü ile stabilize edilen kil zeminlerin geoteknik özellikleri incelenmiştir. Ağırlıkça %5, %10 ve %15 uçucu kül katılan karışımların 1, 7 ve 28 günlük kür yaşı üzerinde özgül ağırlık, likit limit, plastik limit, dane çapı dağılımı, permeabilite, serbest basınç, üç eksenli ve CBR deneyleri yapılmıştır.

Stabilizasyon sonunda, optimum su muhtevasında hazırlanan %5 kireç katkılı karışımın mukavemeti %90 artarken, %5 kireç+%5 uçucu kül katkılı karışımın mukavemeti %95 artmıştır. Bu nedenle kireç ve uçucu küllerin, CL sınıfı kil zeminlerde veya yol temel tabakalarında mukavemeti arttırmak için kullanılabileceği belirlenmiştir.

# **EFFECTS OF FLY ASH ON SOIL STABILISATION**

## **SUMMARY**

**Keywords:** Stabilization, Fly Ash, Lime, Triaxial Tests, Index Properties.

Stabilization methods include physical, chemical and mechanical techniques. These methods improve strength properties of soil or waste materials. Stabilization methods which are known chemical stabilization perform with additive materials and give two advantages: Strength of soil is increased, and waste materials are reused. Thus, waste materials can not cause environmental pollution.

Coal ore of Turkey is 10 billion tons and its 55 million tons burned in the power plant every year. Waste coal fly ashes are 13 million tons and are located on lands. Environmental pollution of fly ash is prevented and reuses of fly ash are very important.

In this study, geotechnical properties of clay soil with the stabilized Orhaneli fly ash were investigated. 5%, 10% and 15% fly ash into of the mixtures added by weight and these mixtures cured at 1, 7 and 28 days. Then, specific gravity, liquid limit, plastic limit, grain size distributions, permeability, unconfined compressive strength, CBR and triaxial tests were carried out.

At the end of stabilization, strength of 5% lime added mixture increased about 90%, and also strength of 5% lime+5% fly ash mixture increased about 95%. This test show that, fly ashes can be used in the CL or road subbase soils to increase strength was determined.

## 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. 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.

Yapılan çalışmada katkı maddeleriyle stabilizasyon yöntemi kullanılmıştır. Uygulaması çok görülen bu yöntem kimyasal stabilizasyon olarak da adlandırılmaktadır. Bu çalışmada katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılmış ve stabilizasyonun etkinliği mekanik deneylerle ölçülmüştür.

Bu çalışmanın; Birinci bölümünde, konu, amaç, kapsam ve stabilizasyonun önemi vurgulanmıştır. İkinci bölümde, uçucu külle yapılmış çalışmalar verilmiştir. Üçüncü bölümde, kimyasal stabilizasyon ve kontrol yöntemlerine değinilmiştir. Dördüncü bölümde, kullanılan malzemeler ve özellikleri belirlenmiştir. Beşinci bölümde, bu çalışmada kullanılan deney metotları açıklanmıştır. Altıncı bölümde, deney sonuçları ve değerlendirilmeleri verilmiştir. Yedinci bölümde çalışmadan elde edilen sonuç ve öneriler sunulmuştur.

İnsanoğlu doğal kaynakları hızla tüketmesine rağmen, enerji ihtiyacı sürekli olarak artmaktadır. Bu nedenle farklı enerji kaynaklarının aranması ve bunların değerlendirilme çalışmaları son 50 yılda hız kazanmıştır. Bu enerji kaynaklarından biri de düşük kalorili linyit kömürüdür. Günümüzde enerji üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Termik santrallerde yakılan bu linyitlerin, ortalama %43'ü atık kül olarak geriye dönmektedir. Bu atık küller, uçucu kül ve dip külü (cüruf) olarak ikiye ayrılmaktadır. Uçucu kül, yanma dumanından elektro statik yöntemle filtre edilen ince partiküllü atıklardır. Yakılan linyit kömürlerinde geriye kalan uçucu kül miktarı ağırlıkça %20 civarındadır. Türkiye'de yaklaşık 200 yıl yetecek kömür rezervi olduğu tahmin edilmektedir [1]. Ülkemizde toplam 11 termik santral faaliyet göstermekte ve yıllık uçucu kül miktarı 13 milyon ton civarındadır [2]. Gelecek yıllarda, enerji ihtiyacının artmasına paralel olarak yeni santrallerin de açılacağı düşünüldüğünde, uçucu kül miktarının daha büyük boyutlarda olacağı tahmin edilebilir.

Yanma sonucunda filtre edilen uçucu küller çevreye karşı zararlı maddeler içermektedir. İçerisinde, kükürtdioksit ve azotoksit gibi zehirli gazlar ile ağır metalleri barındırmaktadır. Bu kirletici maddeler hava, su ve toprak kirliliğine sebep olurken doğal yaşam ve ekolojik dengeyi bozmaktadır.

Bantlar üzerinden tahliye edilen uçucu küller, kül barajlarında depolanmaktadır. Depolama alanında üzeri açık olarak bırakılmakta ve yıllarca orada kalarak zamanla taşlaşmaktadır. Ancak uçucu küllerin çimento veya değişik sanayilerde hammadde olarak yeniden kullanımı mümkün olabilmektedir. Bunlardan en yaygını çimento ve beton içerisinde katkı malzemesi olarak kullanılmasıdır. Ayrıca dayanıklı hafif agrega üretiminde, beton ve asfalt yollarda filler malzemesi olarak, yol temel tabakalarında, boya, endüstriyel seramik ve refrakterlerin üretiminde, katı atıkların stabilizasyonunda da kullanılmaktadır [2].

Uçucu küllerin yol alt temel malzemesi olarak büyük oranlarda kullanılması mümkündür. Bilinen en eski kullanımı da bu şekildedir. İlk ve orta çağın İnşaat mühendisliğinde en ileri ülkesi olan Roma İmparatorluğu, şimdiki İtalya'da Pozzuoli



yakınlarında bulunan volkanik külleri, kireç ve kil ile karıştırıp yol yapımında kullanmıştır. Bundan başka, yaygın olarak kullanılmış zemin iyileştirme malzemelerinden diğeri de kireçtir. Çin'de MÖ 600'lerde, lös zemine açılan 10 m derinliğinde 30 cm çapında kuyulara sönmemiş kireç doldurulması ile zemin iyileştirilmesi yapılmıştır [3].

Uçucu küller yapay puzolanik madde gurubuna giren malzemelerdir. Puzolanik madde (Puzolan) tek başına bağlayıcılık özelliği olmayan ancak ince öğütülmüş durumda kireç ile karıştırıldığında hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanan, silis ve/veya alüminyum silikat bileşimli malzemedir [4].

Günümüzde uçucu kül, ince dane yapısı, yüksek yüzey alanı ve puzolanik özelliklerinden dolayı faydalı ve etkin bir şekilde inşaat sektöründe ve çimento üretiminde kullanılmaktadır. Ancak günümüzde uçucu küllerin çok az miktarı yeniden değerlendirilmektedir. Uçucu kül kullanımının teşvik edilip yaygınlaştırılması gerekmekte ve inşaat malzemesi olarak yeni kullanım olanakları araştırılmalıdır.

Bu çalışmada kullanılan uçucu kül Bursa Orhaneli termik santralinden temin edilmiştir. Bu termik santralde uçucu küller elektro statik yöntemlerle dumandan ayrılır ve bantlar vasıtasıyla depolanmak amacıyla kül barajına gönderilir. Orhaneli santralinde filtre edilen uçucu kül aracı şirket tarafından uygun dane büyüklüğüne getirilip çimento fabrikalarına ve beton santrallerine satılmaktadır. Böylece atık uçucu külün takriben %50'si kullanıma yeniden kazandırılmaktadır. Satışı yapan firma laboratuvarından alınan deney raporlarına göre Orhaneli uçucu külü, F sınıfı ve puzolanik aktivitesi normal seviyede bir uçucu küldür. (Bkz. Tablo 4.8)

Yapılan çalışmalar F tipi uçucu küllerin puzolanik reaksiyona girmek için kirece ihtiyaç duyduğunu ortaya koymaktadır. Yapılan başka bir çalışma da ise katkı olarak zemine katılabilecek faydalı kireç oranını %5 ve %10 arasında olduğu belirlenmiştir [5]. Bu nedenle, çalışmada kullanılan kireç katkı oranı %5 olarak seçilmiştir.

Çalışmada %80 kaolin minerali içeren Mask1 (M1) kili kullanılmıştır. Bu kil Bilecik yöresine ait kaolin hammaddesinden, yıkama yöntemi ile ince kumdan arındırılarak üretilmiş ve Bilecik Organize Sanayi Bölgesinde bulunan Matel A.Ş. den temin edilmiştir.

Mask1, Kireç (KK) ve uçucu kül (UK) karışımlarının geoteknik özelliklerini belirlemek amacıyla 5 set karışım kullanılmıştır. Bunlar; %100 M1, %100 M1 + %5 KK, %100 M1 + %5 KK + %5 UK, %100 M1 + %5 KK + %10 UK, %100 M1 + %5 KK+ %15 UK dır. Bu karışımlar üzerinde özgül ağırlık, dane çapı dağılımı, likit limit, plastik limit, ateşte kayıp miktarı, optimum su muhtevası, permeabilite, serbest basınç deneyi, Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve üç eksenli kesme (UU) deneyleri yapılmıştır.

Stabilizasyon sonunda, optimum su muhtevasında hazırlanan %5 kireç katkılı karışımın mukavemeti %90 artarken, %5 kireç+%5 uçucu kül katkılı karışımın mukavemeti %95 artmıştır. Bu nedenle kireç ve uçucu küllerin, CL sınıfı kil zeminlerde veya yol temel tabakalarında mukavemeti arttırmak için kullanılabileceği belirlenmiştir.

## BÖLÜM 2. UÇUCU KÜL İLE YAPILMIŞ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Katkı oranı %5 ila %10 arasında alınarak yapılan stabilizasyon çalışmasında plastisite indisinin katkı oranlarının arttırılması ile azaldığı belirtilmiştir. Aynı çalışmada %5 ila %10 arası katılan kireç optimum sonuçlar verdiği tespit edilmiştir [5].

Bir çalışmaya göre optimum su muhtevası, katkı oranı arttıkça artış göstermektedir. Katkı artışı ile likit limit değerleri artmıştır. Plastik limit değerleri için bir genelleme yapılmamış plastisite indisi özgün davranış göstermiştir [6].

"F" sınıfı Çatalağzı külü ile "C" sınıfı Soma-B külünün karşılaştırılmasının yapıldığı bir diğer çalışmada, "F" ve "C" sınıfı uçucu küllerin benzer kompaksiyon davranışı gösterdiği belirlenmiştir. Her iki sınıf uçucu külün permeabiliteleri çok düşük olduğu için zeminle veya tek başına kullanıldığı zaman permeabiliteyi azalttığı tespit edilmiştir [7].

Alberta (Kanada) ve Amerika'daki bazı termik santrallerden alınan uçucu küllerin optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının belirlendiği bir çalışmada, uçucu küllerin zeminlere göre daha düşük optimum su muhtevası ve birim hacim ağırlığı olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç uçucu küllerde fazla hava boşluğu olması ile açıklanmıştır. Doğal zeminlerde %1 ile %5 hava boşluğu tespit edilmiş, bu oran uçucu küllerde %5 ile %15 arasında değiştiği belirlenmiştir [8].

Kansas'taki üç termik santralden (Hawthorn, Grand Avenue ve LaCygne) alınan uçucu kül örnekleri üzerinde yapılan standart Proktor deneyi sonuçlarının incelendiği bir çalışmada, Grand Avenue Termik Santralinden alınan uçucu külün mükemmel bir dolgu malzemesi olduğu tespit edilmiştir. Aynı çalışmada laboratuvar ve arazi

deneyle yapılarak, çimento-uçucu kül karışımını temel altı stabilizasyon işlerinde kullanabileceği tespit edilmiştir. Uçucu külün çimento, kireç veya zemin karışımları ile kullanılması başarılı sonuçlar vermiştir [9].

ABD'nin West Virginia bölgesindeki iki ayrı termik santralden alınan F sınıfı uçucu külü ile çeşitli oranlarda kireç ve çimento ile karıştırılmıştır. Bu çalışmada karışımlar üzerine kompaksiyon, serbest basınç dayanımı ve permeabilite deneyleri uygulanmıştır. Permeabilite deneyinde sabit seviyeli permeabilite deney aleti kullanılmıştır. %3, %9 ve %15 oranlarında kireç ve çimento ayrı ayrı iki "F" sınıfı uçucu kül numunesine katılmıştır. Kireç ve çimento ilave edilen karışımların geçirgenliği artmıştır. Sadece %15 kireç ilavesinde permeabilite değeri  $7.2 \times 10^{-7}$  m/sn'den  $7.1 \times 10^{-8}$  m/sn'ye düşmüştür [10].

Atık depolama sahalarında yapılan bir araştırmada, uçucu kül kullanarak geçirimsiz tabakalar imal edilmiştir. Bu yöntem ile daha ekonomik sızdırmaz tabakası oluşturulacağı tespit edilmiştir. Çalışmada puzolanik özelliğe sahip iki "C" sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Harvard kompaksiyon aleti ile arazide kullanılacak optimum su muhtevası ve bu sıradaki maksimum birim hacim ağırlık tespit edilmiş ve 4 değişik uygulama sonucu, uçucu kül veya bentonit miktarı artarken hidrolik geçirgenliğin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada ıslanma-kuruma veya donma-çözülme sonucu permeabilitenin değişmediği belirlenmiştir. Çalışma neticesinde optimum su muhtevası, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve sıkıştırılmış uçucu kül ile su ilavesi arasında geçen süre permeabiliteyi ve uçucu kül-kum karışımının yoğunluğunu doğrudan etkilediği belirlenmiştir. Ayrıca aynı çalışma ile Çinko, kadmiyum ve bor gibi elementlerin uçucu kül tarafından tutulabildiği de belirlenmiştir [11].

Bir araştırma ile otoyol inşaatlarında kullanılmak üzere doğal kil, uçucu kül ve ikisinin karışımları arasında matematiksel bir bağıntı geliştirmiştir. F sınıfı uçucu kül numunesi ile doğal kil numunesini karıştırarak deneyler yapılmış ve permeabilitenin azaldığı tespit edilmiştir [12].

Kireç çamuru ile uçucu kül karışımı mühendislik özellikleri üzerine yayınlanmış bir çalışmada "F" sınıfı uçucu kül kullanılmış, elek analizi ve hidrometre analizlerinden sonra uçucu kül ve kireç çamuru karışım oranları tayin edilmiş ve bu karışım oranlarına göre kompaksiyon, serbest basınç ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. Uçucu kül ile kireç çamuru karışımlarının atık depolama sahalarında geçirimsiz tabaka ve dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir [13].

Çeşitli miktarlarda çimento-bentonit ve kireç-bentonit kum karışımlarına %5, %10, %15 ve %20 oranlarında uçucu kül ilave ederek yapılan karışımlara serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Sıkışma oranlarına bağlı olarak uzun kür sürelerinde, uçucu kül ilave oranlarının artışı ile dayanım değerlerinin de arttığı görülmüştür. Kil gibi kohezyonlu zeminlerde olduğu gibi kumlu zeminlerde de dayanım değerleri artmıştır [14].

Bir çalışmada, Heartland yarış pistinde kullanılan "C" sınıfı uçucu kül ile tabii zemin karıştırılması sonunda CBR değerinin arttığı ve zemin şişme potansiyelinin azaldığı tespit edilmiştir [15].

### **BÖLÜM 3. KİMYASAL STABİLİZASYON VE STABİLİZASYON KONTROL YÖNTEMLERİ**

Zemin stabilizasyon yöntemleri genelde zeminin birden fazla özelliğini iyileştirmektedir. Bu nedenle bu yöntemleri belirli tek bir sınıflandırma sistemi altında toplamak uygun olmayabilir. Ancak en genel haliyle stabilizasyon yöntemleri mekanik, ısıl ve kimyasal stabilizasyon olarak üçe ayrılmaktadır. Bunlardan ekonomik ve uygulaması kolay olan kireç, uçucu kül, çimento gibi katkı malzemeleriyle yapılan kimyasal stabilizasyon yöntemleri bütün dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır.

Zemin stabilizasyon yöntemleri kısaca şu şekilde ifade edilmektedir [16, 17, 18].

#### **Mekanik stabilizasyon yöntemleri:**

- Derin kompaksiyon
  - Patlatmayla sıkıştırma
  - Kompaksiyon enjeksiyonu
  - Sondalı titreşim teknikleri
  - Ağır tokmakla sıkıştırma
- Ön yükleme ile stabilizasyon
  - Ön konsolidasyon
  - Drenaj ve drenlerle konsolidasyon
- Ortamın donatılandırılması
  - Taş kolonlar
  - Kompaksiyon kazıkları
  - Ankraj ve çivileme tekniği
  - Kök kazıkları
  - Kireç kuyularıyla stabilizasyon
  - Donatılı zemin (çelik, alüminyum, plastik vb.)

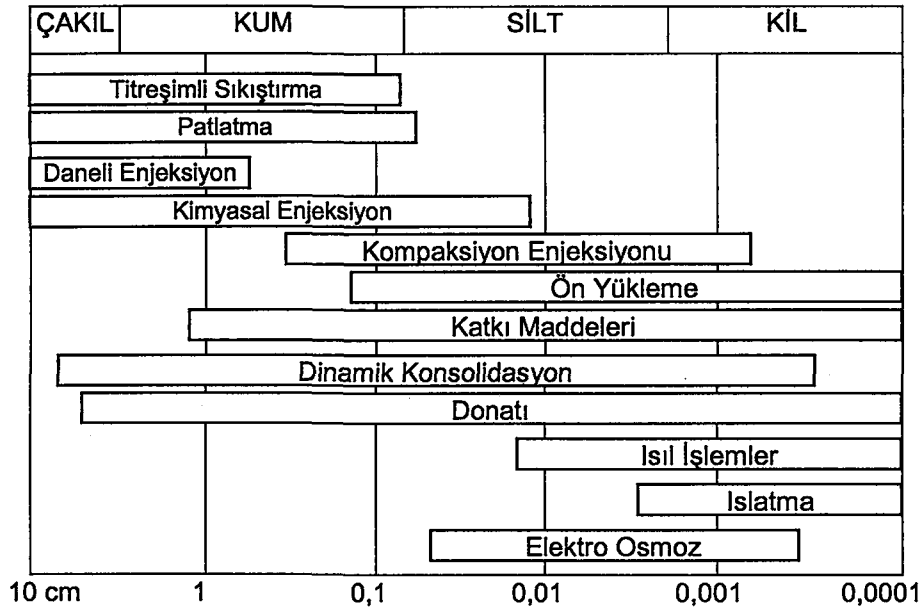
**Isıl işlemlerle stabilizasyon yöntemleri:**

- Dondurma yöntemleri
- Yüksek sıcaklıkta stabilizasyon

**Kimyasal stabilizasyon yöntemleri:**

- Enjeksiyon teknikleri
  - Daneli enjeksiyonu
  - Kimyasal karışım enjeksiyonu
  - Jet enjeksiyonu
- Katkı maddeleri ile stabilizasyon
  - İnorganik stabilizasyon
    - ▲ Çimento
    - ▲ Kireç
    - ▲ Bitüm
    - ▲ Uçucu kül
    - ▲ Alçı
  - Organik stabilizasyon
    - ▲ Organik polimerler
    - ▲ Biyolojik yöntemler

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi dane çapı ile stabilizasyon arasında önemli bir ilişki vardır. Çakıl ve kumlar için geçerli tekniğin, ince daneli zeminlerde beklenen başarıyı sağlamayacaktır. Bunun en önemli nedeni olarak killerde yüzeysel kuvvetlerin etkin ve permeabilitenin düşük olması gösterilmektedir [3].



Şekil 3.1 Stabilizasyon yöntemlerinin uygulanabilirliği (Önalp, 1983)

Stabilizasyon yönteminin seçiminde zemin dane çapı çok önemli bir göstergedir. Ayrıca kimyasal etkilerin de göz önünde tutulması önemlidir.

Bu çalışmada katkı maddeleriyle iyileştirme yöntemi kullanıldığından aşağıda kimyasal stabilizasyon yöntemleri anlatılmıştır.

### 3.1 Kimyasal Stabilizasyon Yöntemleri

Çimento, kireç, uçucu kül gibi malzemeler, daneler arasındaki bağı kuvvetlendirmek ve aralarındaki boşlukları doldurmak suretiyle zemini iyileştirmektedir. Bu malzemeler zemine enjekte edilebilir veya zeminle karıştırılabilir. Enjeksiyon teknikleri, zeminin partikül yapısının sağlam kalmasına yardımcı olmak amacıyla kimyasal maddelerin zeminin boşluklarına veya zemindeki çatlaklara enjekte edilmesini kapsamaktadır. Burada amaç değişik viskoziteli şerbetlerin zeminin mevcut çatlaklarına enjekte edilmesini sağlamaktır [16].



Katkı malzemeleriyle stabilizasyonda, katkı malzemesi zemine ilave edilmekte ve zeminin partikül yapısı değiştirilmektedir. Karıştırma işlemi ya mekanik olarak (zeminle birlikte karıştırma şeklinde) veya hidrolik olarak (jet enjeksiyonu şeklinde) yapılmaktadır. Katkı maddeleriyle ve jet enjeksiyon yöntemlerinin ikisinde de üniform bir zemin-çimento karışımı oluşturulmaktadır. Kolonları örtüştürmek suretiyle yeraltında duvarlar veya diyaframlar inşa edilebilmektedir [16,18].

### 3.1.1 Enjeksiyon teknikleri

#### 3.1.1.1 Daneli enjeksiyon

Daneli enjeksiyon, zemin yapısını bozmayacak şekilde düşük viskoziteli bir şerbetin zemine verilmesi şeklinde yapılmaktadır. Bu işlemde, daneli şerbetler (çimento, uçucu kül, bentonit, mikro-çimento gibi) veya kimyasal enjeksiyon maddeleri (silikat, lignin jöleleri, fenolik ve akrilik reçineler gibi) kullanılmaktadır. Daneli enjeksiyonda zemin dane çapı çok önemlidir. Çakıl ve kum gibi iri gözenekli zeminlerde, viskoz çimento şerbetleri de dahil olmak üzere hemen her çeşit enjeksiyon maddesi kullanılabilir. Kimyasal enjeksiyon maddelerinin viskozitesi daneli şerbetlere göre daha düşüktür. Ancak mikro-çimentolu şerbetlerin viskozitesi, kimyasal enjeksiyon maddelerinin viskozitesi kadar düşük olabilir. Bu nedenle ince kumlarda kullanımı daha uygundur. Zeminde kil, silt, gibi ince daneli malzemenin varlığı dane enjeksiyonunu etkilemekte ve tesiri önemli ölçüde azalmaktadır [3, 16].

Daneli enjeksiyon, iki ana mekanizma ile zemin iyileştirmesi sağlamaktadır. Birincisi, şerbetin münferit zemin taneleri arasındaki teması güçlendirme eğiliminde olması ve bu şekilde enjeksiyon yapılmayan zemine göre iskelet yapısı daha kuvvetli ve daha rijit olan bir zemin oluşturulmasıdır. Diğeri de, enjeksiyon maddesinin zemin taneleri arasındaki boşlukları doldurması ve bu şekilde tekrarlı yükleme sırasında oluşacak sıkışma veya aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu azaltılmaktadır. Daneli enjeksiyon ile iyileştirilen zeminlerin kayma dayanımı 345 ile 2070 kPa arasında değişmektedir [16].

### 3.1.1.2 Kimyasal karışım enjeksiyonu

Kimyasal karışım enjeksiyonu işleminde sıvı enjeksiyon maddesi zeminde çatlak oluşturacak basınç altında kontrollü şekilde zemine uygulanır. Burada amaç, enjeksiyon maddesinin zemin partikülleri arasındaki küçük boşluklarda akmasını sağlamak olmadığından, nispeten viskoz (ve kuvvetli) çimento şerbetleri kullanılabilir. Teorik olarak ilk çatlakların küçük asal gerilme düzlemlerine paralel olması beklenir. Fakat, gözlemler bunların daha çok zayıf tabakalanma düzlemlerini takip ettiğini göstermektedir. İyileştirme için ilk şerbetin verilmesinden sonra, tekrarlanan kimyasal karışım enjeksiyonu, zemini değişik düzlemler boyunca çatlatmaktadır. Sonuçta, birbirini kesen enjeksiyon merceklerinden oluşan üç boyutlu bir ağ ortaya çıkar. Zeminde bir miktar sıkışma meydana gelmektedir. Ancak iyileştirmenin ana mekanizmasına uygun olan Rijitlik ve mukavemet artışı sağlanmasıdır. Bu da zemin kütlelerinde enjeksiyon maddesinin katılmış merceklerinden ileri gelmektedir [16,17,18].

### 3.1.1.3 Jet enjeksiyonu

Jet enjeksiyonunda zemin, önceden açılmış bir sondaj kuyusunda, yüksek basınç altında yatay olarak enjekte edilen çimento şerbeti ile karıştırılır. Şerbetin değişik yönlerde yerleştirilmesi için enjeksiyon deliği (nozzle) döndürülür. Karıştırma işlemine yardımcı olması bakımından sadece hava veya hava ile su enjekte edilebilir. Jet enjeksiyonu kuyunun tabanında başlar ve geride nispeten üniform bir zemin-çimento karışımı bırakarak yukarı doğru yavaş yavaş çekilerek zemin içinde kolonlar oluşturulur [16,18].

Jet enjeksiyonu her türlü inorganik zemine uygulanabilir. Enjeksiyon derinliği, istenen derinlikte yapılabilmektedir.

### 3.1.2 Katkı maddeleri ile stabilizasyon

Katkı malzemeleri ile stabilizasyon yönteminde kireç, çimento, bitüm ve uçucu kül gibi ortama eklenen inorganik veya organik maddeler ile yapılmaktadır. Bu yöntemle

zemin içerisinde mikro ve makro daneler arasındaki bağlar oluşturmak ve kuvvetlendirmek yolu ile zemin özelliklerinin iyileştirilmesi esasına dayanmaktadır. Günümüzde biyolojik yöntemlerle de zemin iyileştirilebilmektedir.

Elektrik santrallerinin yan ürünü olan uçucu kül başarılı bir dolgu malzemesi ve kireçle zemin stabilizasyonunda puzolanik reaksiyonu hızlandıran bir katkı malzemesidir [3]. Geçmişte taşıma maliyetinin yüksekliği nedeniyle uçucu kül kullanımı tercih edilmiyordu. Günümüzde bu maliyetin azalması ve ülke genelinde termik santrallerin bulunması ile bu kullanım sahası genişlemektedir.

Tablo 3.1'de İnorganik ve organik katkı malzemelerinin avantaj ve dezavantajları gösterilmektedir.

Tablo 3.1 İnorganik ve organik katkı maddelerinin karşılaştırılması [19]

Metot	Avantaj ve Dezavantajları
İnorganik Esaslı (kireç, çimento, uçucu kül, kil v.s.)	Malzemeler kolayca temin edilebildiğinden uygulama alanı oldukça geniştir.
	Maliyeti düşüktür.
	İlave edilen malzemelerin kimyasal olarak zehirliliği yoktur.
	Stabilizasyon işlemleri kolaydır ve çok özel aletler ve malzemeler gerekmez.
	Hem fiziksel, hem kimyasal olarak uzun süreli stabilitesi çok iyidir.
	Ultraviyole ve radyasyon tehlikeleri yoktur.
	Stabilize edilmiş malzemenin permeabilitesi düşer, mukavemeti artar.
	İyi bir mekanik ve yapısal karakteristik gösterir.
	15 yıldır yapılan işlemlerde başarı sağlanmış ve iyi bir doküman elde edilmiştir.
	Organik Esaslı (organik polimerler, biyolojik yöntemler vs.)
Çok düşük bir Permeabilite elde edilir.	
Bir çok atık için uygulanabilir.	
Ultraviyole ışınlarının önlemede tam başarılı sayılmaz.	
Mikroorganizmalar için elverişli değildir.	
Uzun süreli stabilite sağlayamaz.	
İnorganik sistemlere göre uygulanması çok zor ve özel aletler gerekir.	
Bazı sistem bileşenleri için tehlikelidir.	

Özellikle ince daneli (kil-silt) zeminlerde kireç gibi bir katkının stabilizasyonda olumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Kireç, genel olarak zeminin plastisitesini azaltmakta, ortamın pH değerini yükselmekte (bazik hale çevirir) ve oluşan puzolanik reaksiyon sonucu bir çeşit çimentolaşma ile dayanım artmasına yol açmaktadır [20].

Çimentolu malzemeler de zemine enjekte edilebilir veya zeminle karıştırılabilir. Bu malzemeler daneler arasındaki bağı kuvvetlendirmek ve aralarındaki boşlukları doldurmak suretiyle zemini iyileştirmektedir.

Ekonomik ve etkili diğer katkı maddeleri ise tuz, kalsiyum klorür, fosforik asit, fosfor tuzları, kostik soda, reçine ve lignin olarak sıralanabilir [3].

### 3.2 Stabilizasyonun Kontrol Yöntemleri

Stabilizasyonun uygulanması yanında ne derece başarılı olduğu kontrolü de önemlidir. Kontrol yöntemleri şöyle sıralanmaktadır:

- Laboratuvar deneyleri
- Arazi deneyleri
- Jeofizik deney teknikleri

Zemin iyileştirmesinin etkinlik derecesinin kontrol edilmesi, zemin stabilizasyon işleminin önemli bir bölümünü oluşturur. Rijitlik, dayanım ve yoğunluk özelliklerinin iyileştirmeden önce ve sonra doğrudan veya dolaylı olarak ölçümü, zemin iyileştirmesinin etkinlik derecesinin güvenilir bir şekilde değerlendirilmesine izin verebilir. Bu özellikler laboratuvar, arazi (in situ) ve/veya jeofizik deneyleri ile ölçülebilmektedir [16].

Zemin iyileştirmesinin başarısı, istenen iyileştirmenin oluştuğunun kontrol edilmesi ile gerçekleşir. Belirli bir zemin iyileştirme tekniğinin etkinlik derecesini kontrol etmenin en kısa yolu, iyileştirmeden önce ve sonra, zemin özelliklerinin ölçülmesidir. Laboratuvar deneyleri uzun zamandır zemin iyileştirmesinde kontrol için

kullanılsa da, arazi deney tekniklerinde son zamanlardaki gelişmelerle kontrol mekanizmaları arttırılmıştır. Şantiye deneyleri, arazi (in situ) deney teknikleri ve jeofizik deney teknikleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [16].

### 3.2.1 Laboratuvar deney teknikleri

Zemin iyileştirilmesinin kontrolünde laboratuvar deney teknikleri kullanmanın sayısız avantajları vardır. Fakat bu tekniklerin bazı tür zemin iyileştirmede kullanılamayışı bunların sağlamış olduğu faydayı azaltmaktadır. İyileştirilmiş zeminden numune alma gereği laboratuvar deney tekniklerinin kullanımında çok sayıda avantaj sağlamakta ve bir o kadar da dezavantajı beraberinde getirmektedir. İyileştirilmiş zeminden numune alma işlemi, iyileştirmenin etkilerini incelemeye izin verir. İyileştirilmiş zeminin incelenilme kolaylığı, çok sayıdaki iyileştirme tekniği (daneli enjeksiyon, katkı maddeleri ile vb.) için iyileştirmenin etkinlik derecesi hakkında doğrudan ve değerli bulgular sağlamaktadır. Laboratuvar deneyleri gerilme, birim deformasyon ve çevresel şartların kontrolü ve daha sağlıklı ölçülmesi bakımından arazi deneylerine kıyasla daha üstündür. Bu esneklik, bazı durumlarda, iyileştirilmiş zemin özelliklerinin daha sağlıklı bir şekilde değerlendirilmesine imkan vermektedir [16].

Diğer taraftan, laboratuvar deneyleri sadece seçilmiş noktalar için kontrol imkanı vermektedir. Laboratuvar deneyleri ayrıca numune örselenmesinin kaçınılmaz sonuçlarından da etkilenmektedir. Bu tip problemler, iyileştirmenin etkinlik derecesinin değerlendirilmesinde hatırı sayılır ölçüde belirsizliklere yol açmaktadır [16].

### 3.2.2 Arazi deney teknikleri

Zemin iyileştirmesinde etkinlik derecesinin laboratuvar deneylerine dayalı yaklaşımlarla kontrol edilmesi konusundaki çoğu kısıtlamalar arazi deneyleriyle ortadan kaldırılmaktadır. Zemin iyileştirmesindeki etkinlik derecesinin kontrol edilmesinde arazi deneylerinin kullanılması son 15-20 yılda önemli ölçüde artmıştır.

Zemin iyileştirmesinin etkinlik derecesinin kontrolünde standart penetrasyon deneyi (SPT) ve koni penetrasyon deneyi (CPT) deneyleri kullanılabilir. SPT ve CPT deneyleri örnekleme ve laboratuvar deneylerine kıyasla nispeten hızlı ve düşük maliyetli deneylerdir. Derinlikle birlikte devamlı kayıt alınması bakımından CPT deneyi özellikle daha yararlıdır [17].

### 3.2.2 Jeofizik deney teknikleri

Zemin iyileştirme tekniklerinin çoğu, iyileştirme için seçilen zeminin rijitliğini artırarak amacına ulaşır. Sismik jeofizik teknikler kullanılarak zeminin rijitliği ölçülebilmektedir. Böylece uygulanan tekniklerin etkinlik derecesi kontrol edilebilir. Sismik deneyler iyileştirmeden önce ve sonra yapılır. Böylece zeminin ilk durumuyla son durumu arasında karşılaştırma imkanı sağlanır ve kullanılan iyileştirme tekniğinin etkinliği ölçülebilir [16, 17].

Kuyudan kuyuya ve kuyu aşağı deneyleri (sismik koni dahil), zemin iyileştirmesinin kontrolünde en çok kullanılan deneylerdir. Bu deneyler sayesinde büyük mesafelerdeki primer (P) ve sekonder (S) dalga hızları ölçülmek suretiyle, rijitliğin alansal bir ortalaması ölçülmüş olmaktadır. Ancak, kuyudan kuyuya ve kuyu aşağı deneylerin her biri için en azından bir sondaj kuyusu açmak gereklidir. Zemin iyileştirmesinin geniş bir sahada yapıldığı alanlarda kontrol amacı bakımından sismik yansıma ve sismik kırılma deneyleri de yararlı olabilir [16, 17].

Bunlara SASW deneyleri denir, sondaj kuyusu açılmasına gerek kalmadan benzer bilgiler sağlayabilir. Rijitliğin iki veya üç boyutta düzensiz olarak değiştiği sahalarda veya kapanım (inclusion) içeren sahalarda SASW sonuçlarının yorumlanması zor olabilir. Böyle deneyler ayrıca fon gürültüsünün (devam eden iyileştirme işinden kaynaklanan gürültüler dahil) sonuçları olumsuz şekilde etkilemediği yerlerde gerçekleştirilmelidir [16].

Ortalama dalga hızını ölçen deneyler, ortalamanın alındığı mesafeler çok küçük olmadığı sürece, ince ve gevşek kesimdeki iyileştirmenin derecesini doğru bir şekilde yansıtmayabilir [16].

Sonuç olarak, çoğu zemin iyileştirme tekniğinin etkinlik derecesini belirli bir sahada önceden kestirmek zor olabilir. Alet, yöntem, deneyim ve yüklenicinin zemin iyileştirme yeteneği gibi faktörler zemin iyileştirmesinin etkinlik derecesini önemli ölçüde etkileyebilir. Bu nedenle, üretime başlamadan veya zemin iyileştirme tekniğinin nihai şekline karar vermeden önce, şantiye alanında önceden belirlenmiş deneme noktalarında kullanılması düşünülen yöntem ile denemeler ve küçük uygulamalar yapılması çoğu zaman büyük yarar sağlar. Bu deney alanları, zemin iyileştirme etkinliği derecesinin sahaya ve yöntemine dayalı değerlendirilmesinin orta düzey maliyette olmasını sağlar. Mümkün olan her durumda deneme noktalarının kullanılmasını tavsiye edilmektedir [16].



## BÖLÜM 4. KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada kullanılan kaolin kili, uçucu kül (UK) ve kalsiyum kirecinin (KK) özellikleri aşağıda verilmiştir.

### 4.1 Kil (Mask 1)

Bu çalışmada kullanılan kil, Bilecik Organize Sanayi Bölgesinde bulunan Matel A.Ş.'den temin edilmiştir. Bilecik yöresine ait kaolin yataklarından alınarak, yıkama yöntemi ile ince kumdan arındırılmakta ve yaklaşık 40 µm altında öğütülerek üretilmektedir. Yıkama su ile yapılmakta ve hiçbir kimyasal madde kullanılmamaktadır. Yıkama sonunda kil-şist grubu malzeme tamamen ayrıştırılmaktadır. Daha sonra Mask 1 (M1) ismi ile piyasaya arz edilmektedir. Bu kilin % 80'i kaolin mineralinden oluşmaktadır. M1 kili %80 oranında kaolinit içermektedir.

M1 kilinin dane çapı dağılımı, kimyasal ve minerolojik özellikleri, Matel A.Ş.den alınmış ve Tablo 4.1, Tablo 4.2 ile Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.1 Mask 1 (M1) kilinin dane çapı dağılımı

Elek açıklığı (µm)	Elek üzerinde kalan yüzde (%)
1	46.8
2	36.0
5	18.6
10	8.0
20	2.2



Tablo 4.2 Mask 1 (M1) kilinin mineral içeriği

Mineraller	İçerik (%)
Kaolinit	79-83
Serbest kuvarst	12-14
İllit	2
Diğerleri	3-6

Tablo 4.3 Mask 1 (M1) kilinin kimyasal bileşimi

Kimyasal bileşikler	İçerik (%)
SiO <sub>2</sub>	49.00-54.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32.00-34.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.60-1.90
TiO <sub>2</sub>	1.00-1.30
CaO	0.10-0.30
MgO	0.10-0.30
Na <sub>2</sub> O	0.00-0.20
K <sub>2</sub> O	0.30-0.70
SO <sub>3</sub>	-
Kızdırma kaybı	10-14

Kaolinit killeri, aktivitesi düşük olan bir mineral olup plastisite kartında yeri A eğrisinin altındadır. Kaolinit, nispeten aktif olmayan bir mineraldir ve teknik anlamda bir kil olsa da silt gibi davranış gösterebilmektedir [16]. Kaolinit killerinin dane büyüklüğü 0.1µm-5µm arasında, altı köşeli pul şeklinde, dane çapı 0,05-0,2 A°, kimyasal formülü Si<sub>4</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub>, özgül yüzeyi 10-20 m<sup>2</sup>/g, likit limiti %29-70, plastik limiti %26-38, şişme-büzülme davranışı az, özgül ağırlık 2,5-2,8 'dir [3].

M1 kili için, Bilecik Meslek Yüksekokulu (BMYO) Geoteknik Laboratuvarında özgül ağırlık, dane çapı dağılımı, likit limit, plastik limit, üç eksenli basınç mukavemeti, Kaliforniya taşıma oranı (CBR), optimum su muhtevası, maksimum kuru birim

hacim ağırlığı ve ateşte kayıp (kızdırma kaybı) miktarı belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 4.4'de gösterilmiştir. M1 kilinin tamamı 75mikron'luk (No:200) elekten geçmiştir, yani M1 tamamen kil ve siltten oluşmaktadır. M1 kil içeriği hidrometre analizi sonucu dane dağılımı grafiğinden hesaplanmış ve Şekil 4.1'de gösterilmiştir. M1 kili, uçucu kül ve kalsiyum kireci dane dağılımı ise Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Tablo 4.4 Mask 1 (M1) kilinin geoteknik özellikleri

Geoteknik özellikler	Mask 1 (M1) özellikleri
Kum (%)	yok
Silt (%)	52,36
Kil (%)	47,64
Likit limit (LL)	43,31
Plastik limit (PL)	25,64
Plastisite indisi (Ip)	17,67
Özgül ağırlık (Gs)	2,54
Zemin sınıfı TS 1500	CL
Zemin sınıfı AASHTO	A-2-7
Kızdırma kaybı (%)	10-14
Optimum su muhtevası (OSM) (%)	21,07
Maksimum kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_k$ ) ( $kN/m^3$ )	15,89
Üç eksenli deneyi kayma dayanımı $q_u$ (28 gün kürlü UU) (kPa)	153
Serbest basınç deneyi kayma dayanımı $q_u$ (28 gün kürlü) (kPa)	61
Maksimum kuru CBR (%)	12
Maksimum yaş CBR (%)	9
Aktivite (Ip/kil%)	0,38

#### 4.2 Uçucu Kül

Türkiye'de 11 termik santralde yıllık toplam 55 milyon ton kömür yakılmaktadır. Bunun büyük bir kısmı düşük kalorili (1.000-3.000 kcal/kg) linyit kömürlerinden oluşmaktadır. Kömürler pulverize (toz halde) olarak yakılmaktadır. Yakma sonunda, 1.100-1.600°C ısıda bacalarda ve elektrofiltrelerde toplanan ince toz

haldeki ve puzolanik özellik taşıyan yanma atıkları büyük oranda baca gazları ile sürüklenir ve uçucu kül olarak adlandırılır. Hava, su ve toprak için potansiyel bir kirlenme kaynağı olan uçucu küller yaygın uygulama olarak termik santral alanı içinde bulunan kül barajına yığılmaktadır [2, 21].

Termik santrallerde yakılan kömürden geriye kalan kül oranı % 50, uçucu kül oranı ise %20 kadardır. Bu atık kül cüruf (dip külü) ve uçucu külden oluşmakta ve ülkemiz termik santrallerinde yılda 20-25 milyon ton atık kül ve 13 milyon ton kadar da uçucu kül üretilmektedir [2].

Uçucu kül içeriğini yakılan kömürün bileşimindeki elementler belirler ve genel olarak küre şeklinde ince danelerden oluşur. Uçucu kül, silika  $\text{SiO}_2$ , alüminyumoksit  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , demiroksit  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve birçok diğer oksitler ve alkalilerden oluşmuştur (Tablo 4.5). Literatürde bazı karışıklıklara neden olan uçucu kül ve dip külü arasındaki temel fark külün alındığı yerdir. Termik santrallerde kömürün yanmasından sonra, uçucu kül çıkan gazdan elektrostatik ayırıcılarla süzülerek toplanır, taban (dip) külü ise (bottom ash) fırın tabanından toplanır. Uçucu kül (fly ash) portland çimentosundan daha incedir ve spesifik yüzey alanları  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$  civarındadır. Dip küllerinin yüzey alanı ise genel olarak  $1000-4000 \text{ cm}^2/\text{g}$  olabilir. Uçucu kül'lerin özgül ağırlıkları yaklaşık  $1,90-2,4$  arasında değişmektedir. Birim ağırlığı gevşek durumda  $5,5 \text{ kN/m}^3$ , sıkışık durumda  $8,5 \text{ kN/m}^3$  civarındadır. Dane boyutları ise  $0,5-200$  mikron arasındadır. Bileşimi santrallere göre değişmektedir [22].

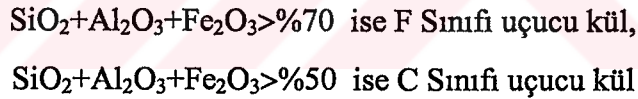
Atık küllerin oluşturduğu çevre kirliliği yeniden kullanım olanaklarının araştırılmasıyla önlenebilir. Atıklar büyük hacimli dolguların yapıldığı yol alt temellerinde kullanılabilir. Mekanik karıştırıcılarla (Plantmix) iyi karıştırılmış kil zemin, kireç ve uçucu kül, atığın verimli kullanımını sağlamakta ve zemin içerisinde çimentolaşma sağlanarak büzülme ve mekanik özellikleri artmaktadır.

Çimentonun etkin maddesi klinker bağlayıcının katılaşma ve sertleşmesini sağlamaktadır. Klinker, %30 kil ve %70 kalkerin  $1500^\circ\text{C}$  pişirilmesiyle elde edilmektedir. Katkısız çimentoda klinkerin su ile reaksiyonu sonucu ortaya çıkan serbest kireç, betonda hidratasyon ısını arttırmakta ve hacim azalması (rötre,

büzülme) meydana getirmektedir. Isı ve hacim değişimini azaltmak için ortamdaki serbest kireç miktarı kontrol altına alınmalıdır. Katkı olarak katılan uçucu kül, çimento içerisindeki serbest kireç ile reaksiyona girerek ani hidrasyon ısı artışını ve ani hacim değişimini engellemektedir [23]. Bunun yanında bu reaksiyonla uçucu küller bağlayıcının ilk gün (ilk bir hafta) mukavemetini düşürür. Bu sebeple bu tip katkılı çimento kullanılan betonlarda kalıp alma süresi uzatılır.

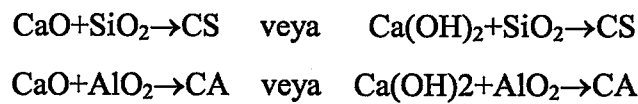
Uçucu kül ve çimento karışımlarında reaksiyon sonucu mukavemet 28 gün kür sonunda normal çimento dayanımı seviyesine gelir. Bu sebeple çimento üretiminde hammadde olarak kullanılan uçucu kül miktarı giderek artmaktadır. Uçucu kül katılan çimentolara, mineral katkılı çimentolar denir ve çimento üretiminde ağırlığının %40-50 oranında uçucu kül ve/veya diğer puzolanik maddeler katılabilmektedir. Bilindiği gibi uçucu kül bir puzolanik maddedir ve tek başına bağlayıcılık özelliği yoktur. Bunların bağlayıcılık özelliği kazanması için, ortamda serbest kireç bulunması ve ince öğütülmesi gerekir.

Uçucu kül standardı TS 639 ve ASTM C618 standart sınırlarına göre, uçucu küller iki ana sınıfa ayrılmaktadır:



olarak tanımlanmaktadır. Diğer limitler Tablo 4.5'te verilmiştir [24, 25].

Puzolanik reaksiyon, silika ( $\text{SiO}_2$ ) ve alümina ( $\text{AlO}_2$ ) ile kalsiyum (CA) arasında oluşan ve çimentolaşma diye tanımladığımız ve betona benzer çok stabil kalsiyum silikatlar (CS) veya kalsiyum alüminatlar (CA) oluşturan yeni bir karışım elde edilmesi olayına denir. Bu reaksiyon zamana, ortamın sıcaklığına ve su içeriğine bağlıdır ve kabaca formülü şu şekildedir:



Puzolanik bir reaksiyonda, kolloidal ve bağlayıcı olmak üzere genelde iki türlü reaksiyon meydana gelir. Ortamdaki  $Ca^{++}$  iyonları çok ince partiküller (kolloidler) ve özellikle kil yüzeyleri üzerindeki diğer iyonlarla yer değiştirir. Kil yüzeyi pozitif değerlikli hale gelir ve yüzey-uç çekimi nedeniyle daneler birbirini tutarlar. Zemin daha iri yapıli hale gelir. Likit limit azalır yani karışım daha az plastik hale gelir. Bu şekilde meydana gelen reaksiyon ani bir reaksiyondur ve zamana bağıli değildir.

Tablo 4.5 Uçucu külleri sınıflandırma sistemi

Elementler	ASTM C618 F Sınıfı	ASTM C618 C Sınıfı	TS 639 Limitleri
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	En az 70.0	En az 50.0	En az 70.0
CaO	<10	>10	-
MgO	En fazla 5.0	En fazla 5.0	En fazla 5.0
$K_2O$	En fazla 5.0	En fazla 5.0	-
$Na_2O$	En fazla 1.5	En fazla 1.5	-
$SO_3$	En fazla 5.0	En fazla 5.0	En fazla 5.0
K.K.(Kızdırma Kaybı)	En fazla 12.0	En fazla 6.0	En fazla 10.0

Kil yüzeyindeki silikatlar ( $Si^{++}$ ) kalsiyum ( $Ca^{++}$ ) iyonlar ile reaksiyona girer. Neticede camsı (jelatin) bir malzeme (CS-kalsiyum silikatlar) oluşur ve zamanla sertleşir. Bu suda erimeyen oldukça dayanıklı bir bağlayıcıdır. Ortamda silikat yok ise CS teşekkül etmez. Bu reaksiyon zamana bağıli bir reaksiyondur [26].

Çalışmada kullanılan uçucu kül, Bursa Orhaneli termik santralinden alınmıştır. Yakın geçmişte santral bir süre kapalı kalmış bu sürede filtre sistemi iyileştirilmiş ve yakılan kömür karışımı değiştirilmiştir. Buda yeni uçucu külün bileşiminin santral kapatılmadan önceki kül bileşimine göre değişmiş olabileceğini düşündürmektedir.

Uçucu kül önce elektrostatik yöntemle dumandan ayrılır ardından separatör yardımıyla istenen maksimum dane çapındaki kısmı alınır. Taşeron şirket (Akdeniz Madencilik ve Çimento San. A.Ş.) tarafından yapılan bu işlemler sonunda uçucu kül çeşitli beton santrallerine ve çimento fabrikalarına satılmaktadır. Satışa sunulan kül bu şirket laboratuvarlarında periyodik olarak tahlil edilmektedir.

Taşeron firmadan alınan uçucu küle ait özellikler Tablo 4.6 ve Tablo 4.7’de gösterilmiştir [27]. Orhaneli uçucu külünün aktivite endeksinin ve puzolanik aktivitesinin Türk Standartlarına uygun olduğu görülmüştür [25] (Tablo 4.8)

Uçucu kül standardı TS 450 göre, uçucu küller puzolanik ve/veya bağlayıcı olarak şöyle ayrılmaktadır:

Reaktif CaO <%10 ve serbest CaO < %1 ve reaktif SiO<sub>2</sub> > %25 ise  
puzolanik (V sınıfı) silissi uçucu kül,

%10> Reaktif CaO > %15 ve reaktif SiO<sub>2</sub> > %25 ise  
puzolanik ve bağlayıcı (W sınıfı ) kalkersi uçucu kül

olarak tanımlanmaktadır.

Tablo 4.6’da, Orhaneli uçucu külünün TS 639’a göre F sınıfı ve TS 450’ye göre de V sınıfı, silissi puzolanik uçucu kül olduğu görülmektedir [25, 28].

Tablo 4.6 Uçucu külün kimyasal analiz sonuçları ve değerlendirilmesi

Kimyasal maddeler	Yüzdeleri %	TS 639 sınırları	TS EN 450 sınırları
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	80,14	en az %70 ( F sınıfı )	-
MgO %	1,45	en fazla%5,0	-
SO <sub>3</sub> %	1,59	en fazla%5,0	en fazla%3,0
Kızdırma Kaybı %	0,65	en fazla%10	en fazla%5,0
Serbest CaO %	0,22	-	en fazla%1,0
Klorür %	0,030	-	en fazla%0,1

Bu çalışmada kullanılan uçucu kül santralden çıkan külün separatörde ayrılmış ince kısmıdır. İşletmeden alınan rapora göre ağırlığının en fazla %40’ı 45mikron’luk elek üzerinde kalmaktadır [27]. BMYO Geoteknik laboratuvarında yapılan hidrometre

analiz sonucuna göre 45µm den büyük dane oranı %30, 90µm dan büyük dane oranı %20 olduğu görülmektedir (Şekil 4.1). Bu oranlar Tablo 4.7’de verilen TS EN 450 sınır değerine de uymaktadır.

Tablo 4.7 Uçucu külün incelik tayini

Elek bakiyesi	Şirketten alınan sonuçlar (%)	Yapılan hidrometre analizi sonucunda (%)	TS EN 450 sınırları
45mikron	42.5	30	En fazla%40
90 mikron	19.9	20	-

Tablo 4.8 Uçucu külün çeşitli yaşlarda (kür süresinde) aktivite endeksi ve puzolanik aktivitesi

Yaşı (kür süresi)	Aktivite endeksi (%)	TS 639 sınırları	Puzolanik aktivite	TS 639 sınırları
7 gün	61.24	-	58,03	-
28 gün	76.04	en az %75	70,90	en az %70
90 gün	86.16	en az %85	78,49	-

Bu çalışma kapsamında yapılan kıvam limitleri deneyleri sonunda uçucu külün plastik olmayan (NP) bir malzeme olduğu tespit edilmiştir. Uçucu külün kıvam limitleri ve ateşte kayıp miktarı sonuçları Tablo 4.9’da, ıslak eleme ve hidrometre deneyleri sonucu uçucu küle ait dane çapı dağılımı da Tablo 4.10’da verilmiş, diğer katkı malzemeleri ile birlikte Şekil 4.1’ de gösterilmiştir.

Tablo 4.9 Uçucu külün indeks özellikleri

	LL %	PL %	Ip %	Gs	Ateşte kayıp miktarı (%) (Kızdırma kaybı)
UK	-	NP	-	2,13	0,65

Tablo 4.10 Uçucu külün ıslak eleme ve hidrometre sonucu dane dağılımı

	Islak eleme No:200(75µm) üstünde kalan	Hidrometre No:200(75µm) altına geçen	
	Kum %	Silt %	Kil %
UK	20	64,32	15,68

### 4.3 Kireç

Kireç, kalsiyum oranı yüksek kireçtaşının 900°C'de pişirilmesi ile elde edilen bir inşaat malzemesidir. Çalışmada kullanılan kireç, Barkisan Bartın Kireç Sanayi'nin söndürülmüş kalsiyum kirecidir (KK) ve içinde en az %80 kalsiyum karbonat bulunduran kalkerden üretilmiştir [29]. 25 kg'lık torbalar halinde piyasadan temin edilen toz kirecin sınıfı S-KK 80 dir ve Türk Standardına göre (TS 4022) bileşimini teşkil eden maddeler Tablo 4.11'de görülmektedir [30].

Kireç plastik olmayan bir malzemedir. Kireç üzerinde ateşte kayıp miktarı, özgül ağırlık, hidrometre, ıslak eleme deneyleri yapılmış ve sonuçlar Tablo 4.12 ve Tablo 4.13'de gösterilmiştir. Katkı olarak karışımlara ilave edilen kireç deneylerden önce etüvde 105±5°C'de bir gün bekletilerek su muhtevasını kaybetmesi sağlanmıştır. Ayrıca KK kil içeriğini tespit etmek için ıslak eleme ve hidrometre analizi yapılmış sonuçlar Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir.



Tablo 4.11 Kalsiyum kirecinin bileşimi (TS 4022)

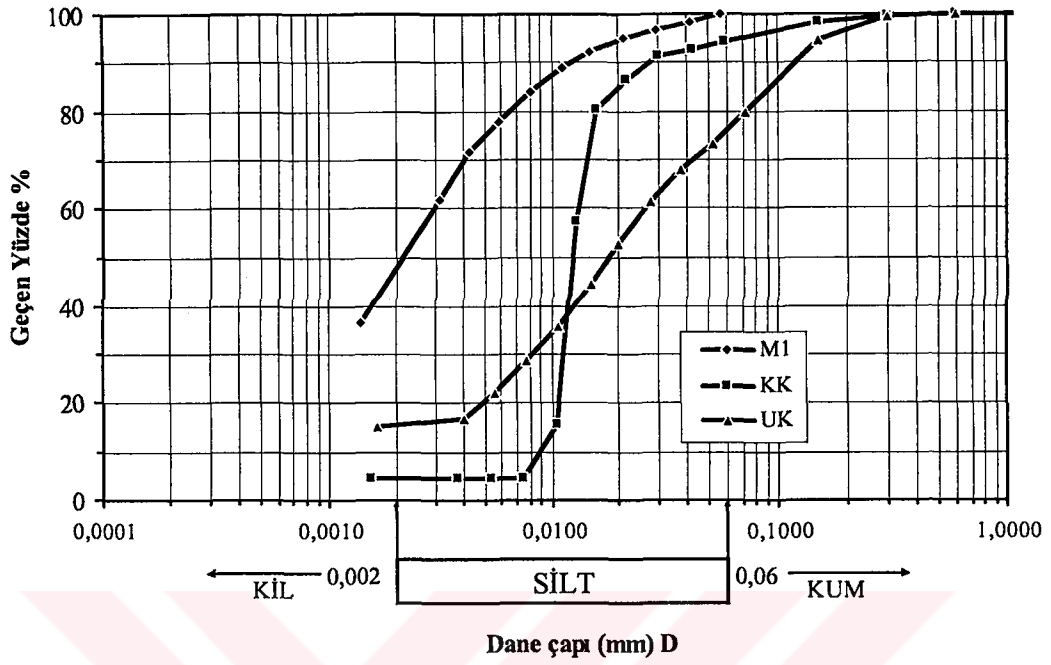
Bileşimi teşkil eden maddeler	Kalsiyum kireci (söndürülmüş) S-KK 80 (ağırlıkça %)
CaO,	en az 80
MgO,	≤ 5
CO <sub>2</sub> ,	en çok 7
Asitte çözünmeyen maddeler, SiO <sub>2</sub> dahil,	en çok 1,5
Metal oksitler: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , SiO 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

Tablo 4.12 Kalsiyum kirecinin indeks özellikleri

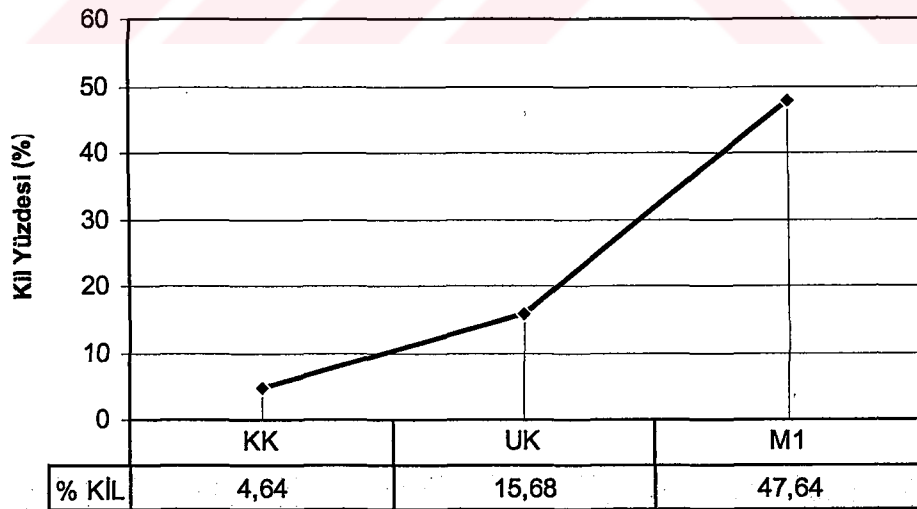
	LL %	PL %	Ip %	Gs	Ateşte kayıp miktarı (%) (Kızdırma kaybı)
KK	-	NP	-	2,42	16,5-18

Tablo 4.13 Kalsiyum kireci ıslak eleme ve hidrometre sonucu dane dağılımı

	Islak eleme No:200(75µm) üstünde kalan	Hidrometre No:200(75µm) altına geçen	
	Kum %	Silt %	Kil %
KK	5,75	89,61	4,64



Şekil 4.1 Kullanılan malzemelerin hidrometre eğrileri



Şekil 4.2 Kullanılan malzemelerin kil içerikleri

## BÖLÜM 5. YAPILAN DENEYLER VE UYGULANAN METOTLAR

Stabilizasyon işlemi için laboratuarda çeşitli oranlarda karışımlar hazırlanmıştır. 24 saat  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'lık etüvde kurutulmuş, bu kuru malzemeler tartılarak, ağırlıkça yüzdelerine göre karıştırılmıştır. Deneyler farklı karışımlar üzerinde yapılmış, ilk deney numunesi (kontrol numunesi) %100 M1 kili olarak belirlenmiştir. İkinci karışıma sadece %5 KK ilave edilmiştir. Sonraki karışımlarda ise %5 KK ile birlikte sırasıyla %5, %10, %15 UK karıştırılmıştır. Bu oranlar Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1 Setler ve kullanılan katkı oranları

Karışım adı	Karışım yüzdeleri	Kısa yazılışı
M1	%100 Mask1	M1 <sup>***</sup>
5KK	%100 Mask1+%5KK <sup>*</sup>	M1+5KK+0UK
5UK	%100 Mask1+%5KK + %5UK <sup>**</sup>	M1+5KK+5UK
10UK	%100 Mask1+%5KK + %10UK	M1+5KK+10UK
15UK	%100 Mask1+%5KK + %15UK	M1+5KK+15UK

\*KK: Kalsiyum Kireci, \*\*UK: Uçucu Kül, \*\*\*M1: Mask1 kili

Karışımlar bir gece küre bırakıldıktan sonra deneye tabi tutulmuştur. Sıkıştırma işlemi için otomatik kompaksiyon aleti kullanılmıştır. Her bir karışım için optimum su muhtevası (OSM) tespit edilmiştir. Bu su muhtevası ile hazırlanan karışımlar desikatörde 1, 7 ve 28 gün küre bırakılmıştır.

Bir gün havada ve dört gün suda kürlenmiş karışımlar üzerinde CBR deneyleri yapılmıştır. Desikatörde 1, 7 ve 28 gün kürlenmiş numuneler üzerinde ise üç eksenli basınç deneyi (UU), 28 gün kürden sonra her bir numune üzerinde serbest basınç,

özgül ağırlık, dane çapı dağılımı, likit limit, plastik limit, ateşte kayıp miktarı ve permeabilite deneyleri yapılmıştır.

### 5.1 Özgül Ağırlık

Karışımların özgül ağırlık deneyi 28 günlük kürden sonra ve TS 1900'de verilen yonteme uygun olarak yapılmıştır [31]. Deneyde kullanılan alet ve malzemenin aynı sıcaklığa gelmesi için su banyosu yerine, termometre ile ortam ve malzeme ısısı kaydedilerek ısı kalibrasyonu yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile suyun özgül ağırlığı ısıya bağlı olarak hesaplanmakta ve hesap bu su yoğunluğuna göre yapılmaktadır. Deney süresini kısaltan bu yöntem kısa sürede birkaç deneyin yapılmasını sağlamaktadır [32]. Özgül ağırlığın hesaplanmasında uygulanan formül şu şekildedir [33];

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

Burada:

$G_s$ = Özgül ağırlık

$\rho_w = \rho_L$ = Suyun yoğunluğu (1 kN/m<sup>3</sup>)

$W_1$ = Piknometre ağırlığı (kN)

$W_2$ = Piknometre + numune ağırlığı (kN)

$W_3$ = Piknometre + numune + Su ağırlığı (kN)

$W_4$ = Piknometre + su ağırlığı (kN)

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

Tablo 5.2 Karışımların özgül ağırlıkları

Karışımlar	Gs
M1	2,54
M1+5KK+0UK	2,60
M1+5KK+5UK	2,58
M1+5KK+10UK	2,57
M1+5KK+15UK	2,56

## 5.2 Likit ve Plastik Limit Deneyi

### Likit Limit Deneyi:

Zeminin plastik durumdan (hamur kıvamından) akıcı duruma geçtiği andaki su muhtevasının sayısal değerine zemin likit limiti denmektedir. Likit limit deneyi TS1900 yöntemine göre yapılmıştır. Karışımlar 28 günlük kür sonunda 105°C'de kurutulmuş daha sonra 200 nolu (75µm) elekten elenmiş ve su ile karıştırılmış, bir gün nem odasında bekletildikten sonra deneye tabi tutulmuştur. Su yüzdesi en az dört noktada arttırılmıştır. 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 (kN)

$w_2$ = Kap + ıslak numune ağırlığı (kN)

$w_3$ = Kap + kuru numune ağırlığı (kN)

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

### Plastik Limit Deneyi:

Zeminlerin katı durumdan plastik kıvama geçtiği andaki su muhtevası değerine zeminin plastik limiti denir. Plastik limit deneyi TS 1900'e göre, 28 günlük kür sonunda her bir karışım için yapılmıştır.

Plastik limit su muhtevası ( $w_p$ ) şu formülle hesaplanmıştır [33];

$$w_p = \frac{w_2 - w_3}{w_3 - w_1} \times 100 \quad (5.3)$$

Burada:

$w_p$ = Plastik limit

$w_1$ = Kap ağırlığı (kN)

$w_2$ = Kap + ıslak numune ağırlığı (kN)

$w_3$ = Kap + kuru numune ağırlığı (kN)

Likit limit ve plastik limitin su muhtevasının farkı plastisite indisi ( $I_p$ ) olarak adlandırılmakta ve şu formülle hesaplanmıştır [33];

$$I_p = (w_L - w_p) \quad (5.4)$$

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

Tablo 5.3 Karışımların kıvam limitleri ve plastisite indisleri

Karışımlar	Likit limit (LL) (%)	Plastik limit (PL) (%)	Plastisite indisi (Ip) (%)
M1	43,31	25,64	17,67
M1+5KK+0UK*	53,00	38,60	14,40
M1+5KK+5UK*	53,21	39,23	13,98
M1+5KK+10UK*	55,34	42,25	13,09
M1+5KK+15UK*	53,72	42,27	11,46

\* 28 gün kürlü

### 5.3 Dane Çapı Dağılımı ve Zemin Sınıflandırması

#### 5.3.1 Elek analizi (ıslak eleme)

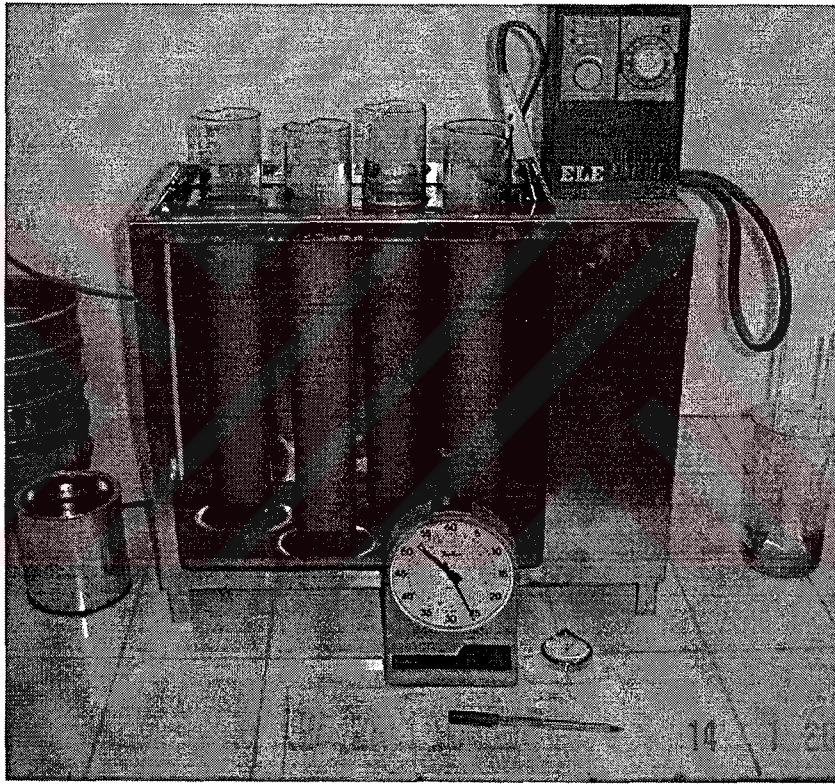
Islak eleme sürekli akan bir su kaynağının altında zeminin ince malzemelerinin yıkanması esasına dayanmaktadır. Yıkama sonunda en son 200 no'lu (75µm) elek üzerinde kalan malzeme miktarı belirlenerek hesap yapılmaktadır. Islak eleme sonucu elde edilen değerler Tablo 5.4'de gösterilmiştir.

Tablo 5.4 Islak eleme deney sonuçları

Malzemeler	Kum (%)	Silt + Kil (%)
KK	5,75	94,25
UK	20,00	80,00
M1	-	100,00
M1+5KK+0UK	-	100,00
M1+5KK+5UK	1,00	99,00
M1+5KK+10UK	2,60	97,40
M1+5KK+15UK	3,00	97,00

### 5.3.2 Hidrometre deneyi

İnce daneli zeminlerin (siltler ve killer) dane çapı dağılımı hidrometre deneyi ile bulunmaktadır. Bu deneyde süspansiyon içindeki çökme hızlarının, dane çapına bağlı olarak değiştiğini gösteren “stokes kanunu” kullanılmaktadır. 50g 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 5.1 Hidrometre deney düzeneği

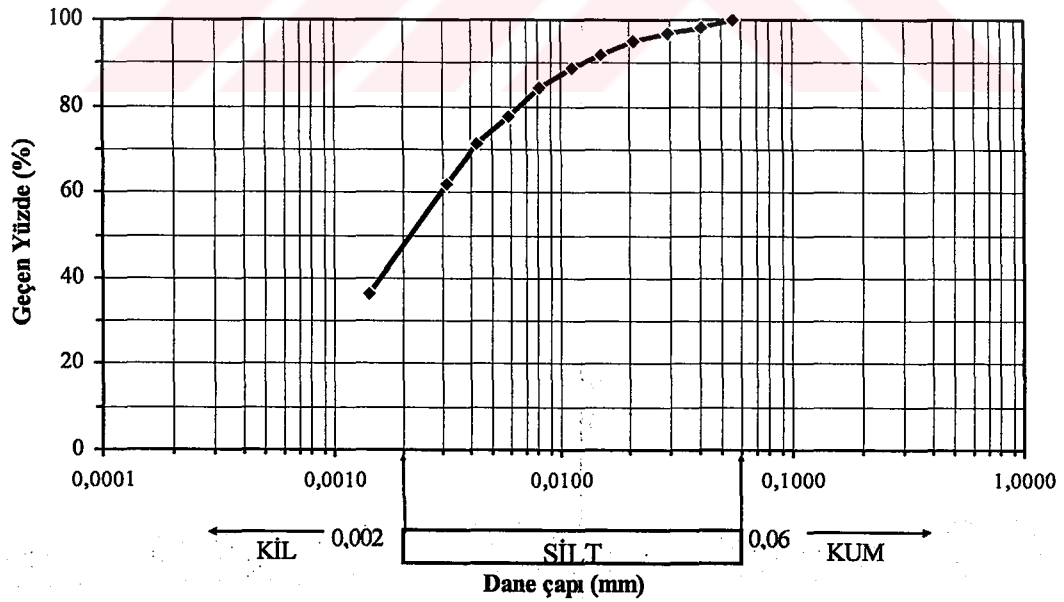
Zemin daneleri su içinde bir süspansiyon haline getirilirken, danelerin birbirine yapışmaması için genellikle Sodyumhexameta-fosfat kullanılmaktadır. Süspansiyon iyice karıştırıldıktan sonra, çökelmeye bırakılması anından itibaren değişik zaman aralıklarında yoğunluk ölçümleri yapılarak zemin içindeki 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'da anlatılan yöntem kullanılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.5'te görülmektedir. Şekil 5.2'de ise M1'e ait dane dağılım eğrisi görülmektedir.

Tablo 5.5 Hidrometre deney sonuçları

Malzemeler	Silt %	Kil %
KK	89,61	4,64
UK	64,32	15,68
M1	52,36	47,64
M1+5KK+0UK	51,30	48,70
M1+5KK+5UK	56,69	42,31
M1+5KK+10UK	58,19	39,21
M1+5KK+15UK	60,50	36,50



Şekil 5.2 M1 kili dane dağılımı

### 5.3.3 Zemin sınıflandırması

Karışımların sınıflandırılması için TS 1500'de önerilen birleşik zemin sınıflandırma metodu ve AASTHO metodu kullanılmıştır. Sınıflandırma sonunda elde edilen değerler Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6 Karışımların zemin sınıfları

Karışımlar	Zemin sınıfı	
	TS 1500	AASTHO
M1	CL	A-2-7
M1+5KK+0UK	MH	A-7-5
M1+5KK+5UK	MH	A-7-5
M1+5KK+10UK	MH	A-7-5
M1+5KK+15UK	MH	A-7-5

### 5.4 Ateşte Kayıp Miktarı (Kızdırma Kaybı)

Ateşte kayıp miktarı, malzeme içindeki organik maddelerin kaba bir ölçüsünü vermektedir. Ancak yanma sırasında karbon bileşiklerinin de yanması sonucunda, organik madde miktarından daha yüksek bir değer elde edilmektedir. Ateşte kayıp miktarı ayrıca kızdırma kaybı olarak da bilinmektedir.

Ateşte kayıp miktarı 28 günlük küre bırakılmış karışımlar üzerinde yapılmıştır. Kür sonunda her bir setten 50-55 g numune alınarak önce 105°C'de 24 saat kurutulmuş ve ağırlığı ölçülmüştür. Kurutulmuş bu numune daha sonra 550°C'lik etüvde 2 saat yakılmıştır. Bu yakma sonunda numunenin ağırlığı tekrar ölçülmüş deney sonunda ateşte kayıp miktarı şu formülle hesaplanmıştır [35];

$$W_k = \frac{W_0 - W_s}{W_0} \times 100 \quad (5.5)$$

Burada:

$W_0=550$  °C sonucu ölçülen ağırlık (kN)

$W_S=110$  °C sonucu ölçülen ağırlık (kN)

$W_k$ =ateşte kayıp miktarı (%)

Deneyde elde edilen ateşte kayıp miktarları Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.7 Karışımların ateşte kayıp miktarı

Karışımlar	Ateşte Kayıp Miktarı % (Kızdırma Kaybı)
M1	10-14
M1+5KK+0UK	13,0
M1+5KK+5UK	12,2
M1+5KK+10UK	11,1
M1+5KK+15UK	10,5

### 5.5 Serbest Basınç Deneyi

Zeminlerin kayma mukavemetini belirlemek için yapılmaktadır. Laboratuarda, her bir karışım için 28 günlük kür mukavemetleri belirlenmiş ve elde edilen kayma dayanımları Tablo 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.8 Karışımların serbest basınç deneyi sonucu kayma dayanımları

Karışımlar	28 gün kürlü $q_{u \text{ maks}}$ (kPa)
M1	61
M1+5KK+0UK	274
M1+5KK+5UK	365
M1+5KK+10UK	513
M1+5KK+15UK	462

## 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:

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



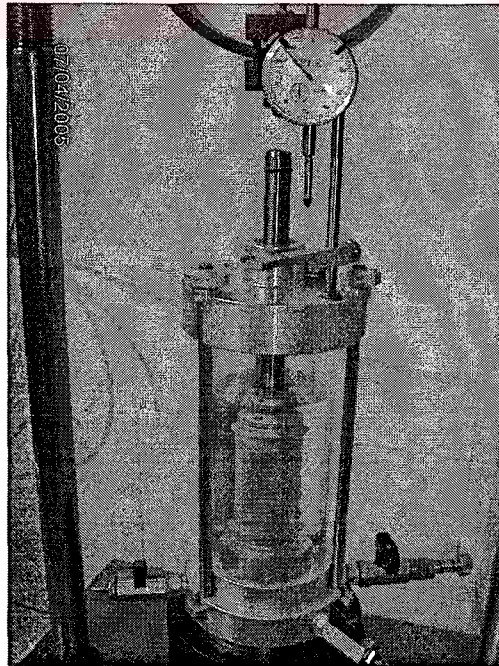
Şekil 5.3 Üç eksenli deneyde numune yerleştirme

Bu çalışmada Konsolidasyonsuz Drenajsız Deney (UU-Unconsolidated Undrained) kullanılmıştır. Deneyde çevre (hücre) basıncı uygulandıktan hemen sonra deviatör

gerilme artırılarak numunenin kesilmesi sağlanmıştır. Deviyatör gerilmenin hızlı bir şekilde uygulanması ile deney süresince numunedeki suyun drenajına müsaade edilmemektedir. Bu deneyin doymun haldeki kil numunelerle yapılması halinde içsel sürtünme açısı ( $\phi = 0$ ) daima sıfır olmaktadır. Deney sonunda zeminin kohezyonu (Cu) elde edilmektedir. Deney TS 1900'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 qu değerleri Tablo 5.9'da gösterilmiştir.

Tablo 5.9 Karışımların üçeksenli deney, maksimum kayma dayanımları (qu) değerleri

Karışımlar	Kür süresi sonunda qu (kPa)		
	1gün (24saat)	7gün	28gün
M1	207	131	153
M1+5KK+0UK	294	370	385
M1+5KK+5UK	131	391	477
M1+5KK+10UK	280	374	573
M1+5KK+15UK	317	406	463



Şekil 5.4 Üçeksenli deney hücresi

### 5.7 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR)

Karışımların Kaliforniya Taşıma Oranları ıslak ve kuru olarak ayrı ayrı belirlenmiştir. CBR için TS 1900 yöntemi kullanılmıştır. Karışımlar optimum su muhtevasında karıştırılmış ve bir gece desikatörde bekletilmiştir. CBR kalıbına otomatik kompaksiyon aleti ile üç kademe halinde her kademeye 2.5 kg'lık tokmakla 31,5cm den 56 vuruş ile sıkıştırılmıştır (ASTM-D698 B). Kalıplardan biri hemen CBR deneyine tabi tutulmuştur. İkinci kalıp 4 gün su havuzunda bekletilerek şişmenin olup olmadığı gözlenmiştir. Karışımların ıslak ve kuru maksimum CBR değerleri Tablo 5.10'da görülmektedir.



Şekil 5.5 CBR deneyi

### 5.8 Kompaksiyon Deneyi

Optimum su muhtevası (OSM) zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığındaki su muhtevası olarak tarif edilmektedir. Deney TS 1900'de önerildiği şekilde

uygulanmıştır. Deneylere %15 su miktarıyla başlanmış ve 2.5 kg'lık tokmak kullanılmıştır. Deney sonuçları Tablo 5.11'de verilmektedir.

Tablo 5.10 Karışımların ıslak ve kuru maksimum CBR değerleri

Karışımlar	Maksimum Kuru CBR	Maksimum Islak CBR
M1	12	9
M1+5KK+0UK	23	23
M1+5KK+5UK	22	25
M1+5KK+10UK	24	19
M1+5KK+15UK	28	19

Tablo 5.11 Karışımların optimum su muhtevası ve kuru birim ağırlıkları

Karışımlar	Optimum Su Muhtevası ( $w_{opt}$ , %)	Maksimum Kuru Birim Ağırlık ( $\gamma_k$ ) kN/m <sup>3</sup>
M1	21,07	15,89
M1+5KK+0UK	25,15	14,59
M1+5KK+5UK	25,39	14,50
M1+5KK+10UK	24,90	14,53
M1+5KK+15UK	24,78	14,52

### 5.9 Sabit Seviyeli Permeabilite

Setler OSM ile karıştırılmış bir gece desikatörde bekletilmiş ve daha sonra standart kompaksiyon şartlarında sıkıştırılmıştır. Sabit yükseklikte su basıncı (su sütunu) altında deneye tabi tutulmuştur. Deney sonuçları Tablo 5.11'de gösterilmektedir.

Tablo 5.12 Karışımların permeabilite katsayısı (m/sn)

Karışımlar	Permeabilite Katsayısı (m/sn)
M1	$2.99 \times 10^{-10}$
M1+5KK+0UK	$1.02 \times 10^{-9}$
M1+5KK+5UK	$8.96 \times 10^{-10}$
M1+5KK+10UK	$4.78 \times 10^{-10}$
M1+5KK+15UK	$1.79 \times 10^{-10}$

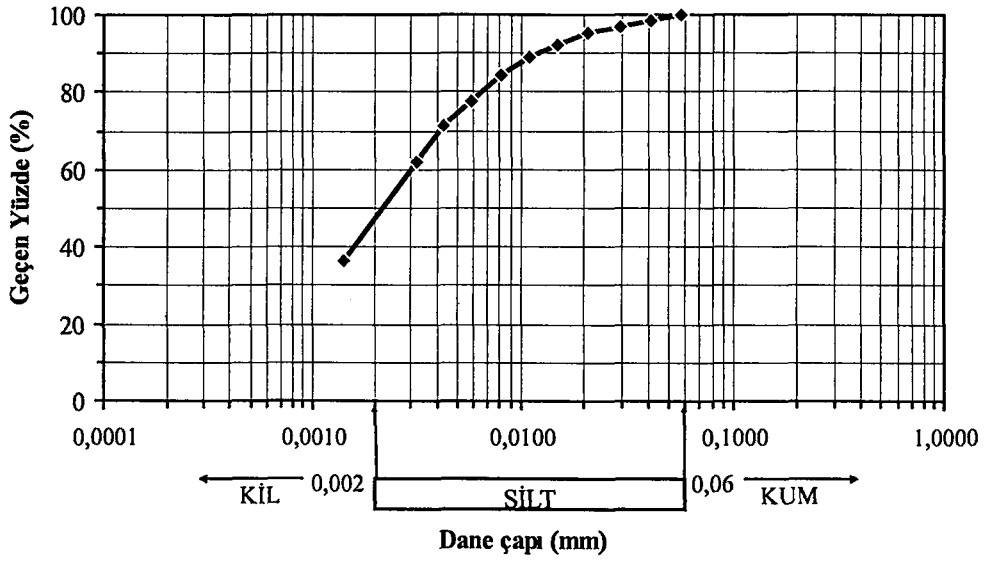


## **BÖLÜM 6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME**

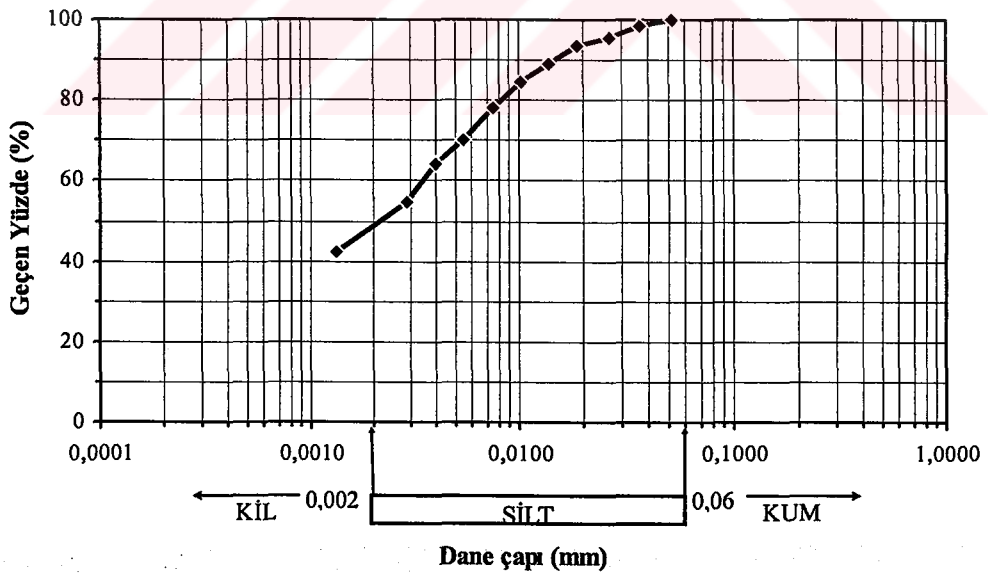
Bu çalışmada yapılan karışımlar, aynı hazırlama ve bekleme süreleri ile yapılmış ve olası hatalar en aza indirgenmeye çalışılmıştır. Karışımlar 1, 4, 7 ve 28 gün kür süresi boyunca desikatörde bekletilmiş (kür edilmiş) ve daha sonra deneylere tabi tutulmuştur. Deney sonuçları aşağıdaki başlıklar altında verilmiştir. Katkı maddeleri ve M1 kili üzerinde yapılan deney ve sonuçları, Bölüm 4'de sunulmuştur.

### **6.1 Karışımların Dane Çapı Dağılımı**

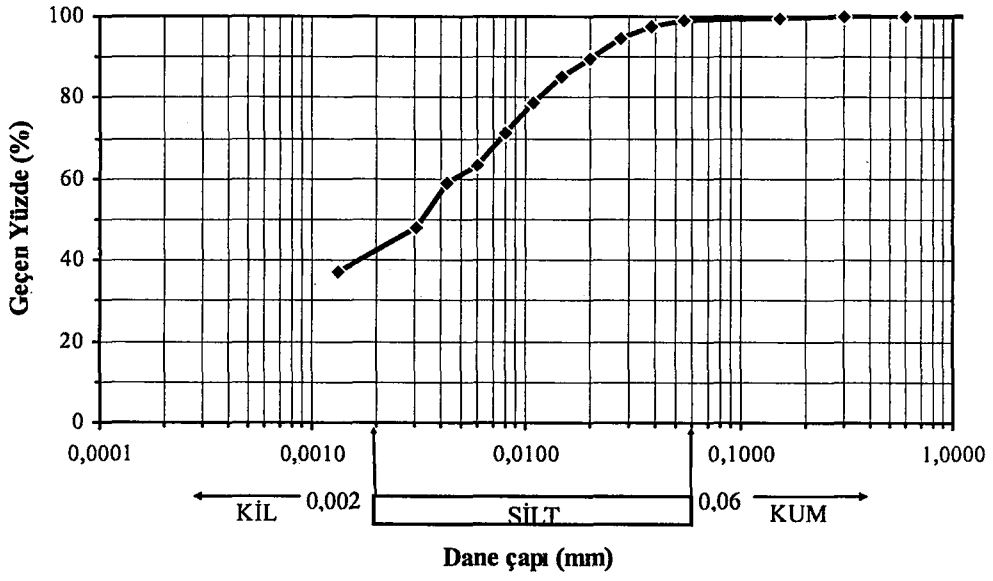
Karışımların dane çapı dağılımı için, 28 gün kür edilen karışımlar kullanılmıştır. Bu numuneler etüvde kurutulmuş ve ezilmiştir. Daha sonra numuneler ıslak eleme deneyine, ardından hidrometre analizine tabi tutulmuştur. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de görüldüğü gibi, M1 ve 5KK karışımlarında kum içeriğine rastlanmamış, diğer karışımlarda ise stabilizasyon sonunda kum oranının sabit kaldığı belirlenmiştir. Hidrometre analizi sonuçlarından elde edilen dane çapı dağılımı eğrilerine göre, UK katkı oranları artarken kil miktarının azaldığı, silt miktarının arttığı tespit edilmiştir (Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5). Karışımlara ait kum, silt ve kil miktarları Tablo 6.1'de verilmiştir. Şekil 6.6'da görüldüğü gibi karışımların kil miktarı azaldıkça plastisite indisi de azalmıştır.



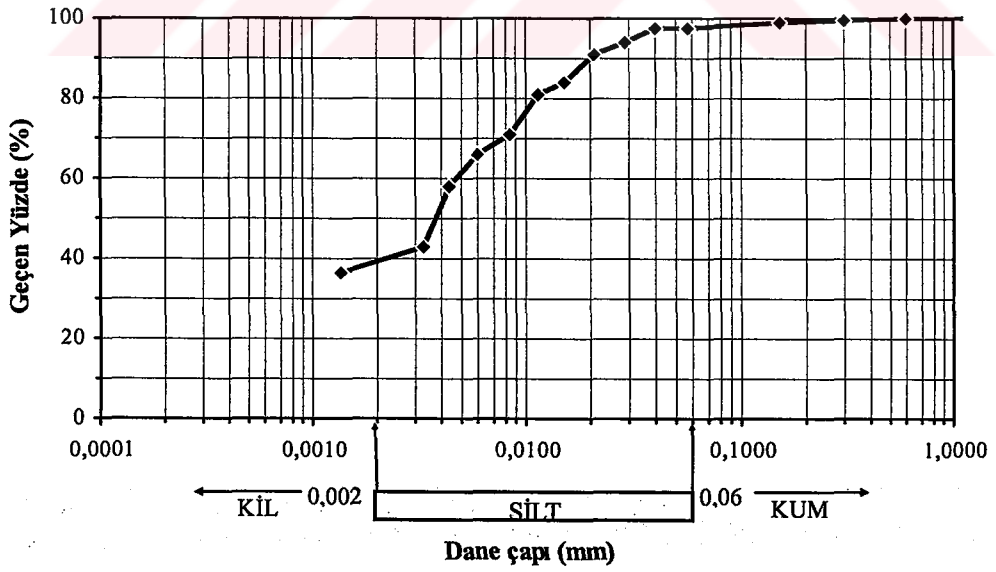
Şekil 6.1 M1 kiline ait hidrometre analizi



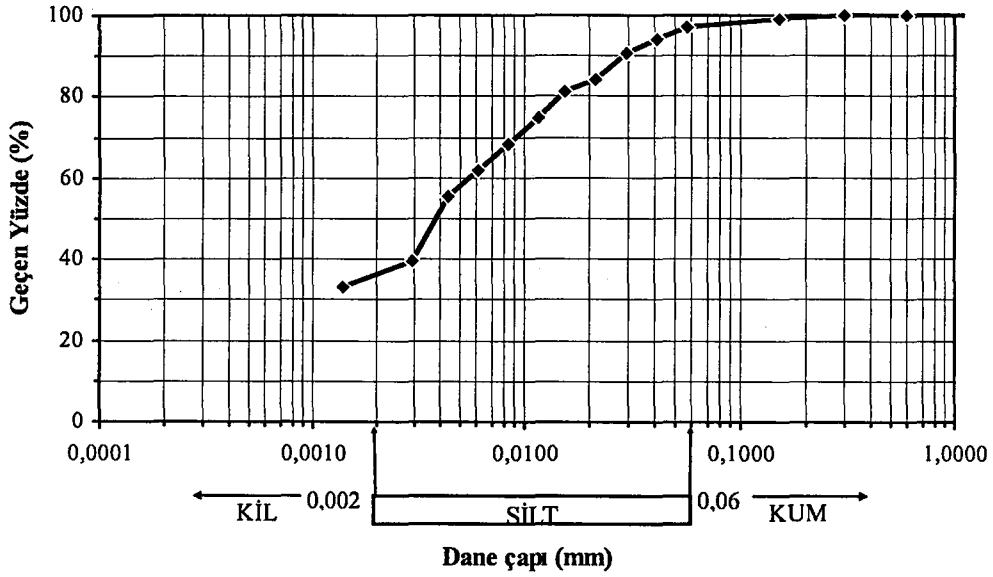
Şekil 6.2 5KK karışımı için hidrometre analizi



Şekil 6.3 5UK karışımı için hidrometre analizi



Şekil 6.4 10UK karışımı için hidrometre analizi



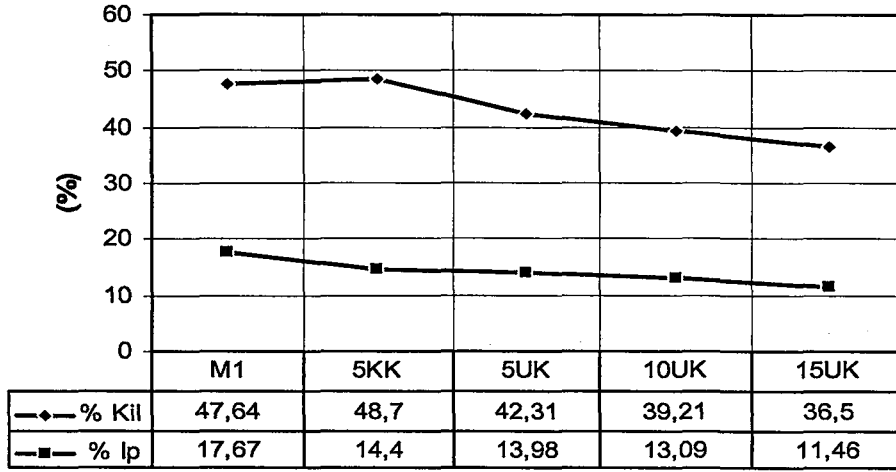
Şekil 6.5 15UK karışımı için hidrometre analizi

Tablo 6.1 Karışımların dane çapı dağılımı

Dane sınıfı	M1	5KK	5UK	10UK	15UK
Kum (%)	-	-	1,00	2,60	3,00
Silt (%)	52,36	51,30	56,69	58,19	60,50
Kil (%)	47,64	48,70	42,31	39,21	36,50

## 6.2 Karışımların Kıvam Limitleri

Stabilizasyondan sonra yapılan likit limit ve plastik limit deneylerinden katkı oranlarının artması ile plastisite indisin düştüğü belirlenmiştir (Şekil 6.6). Yapılan deneylere göre katkı oranları artışı ile likit limit değerleri 10 UK'ya kadar artmıştır. Plastik limit değerleri 15 UK'ya kadar artmıştır. Bu artış katkı oranları ve dane çapı artışına paralel olmuştur (Şekil 6.6). Likit limit değeri 10 UK'da en büyük değerine ulaşmış, %15 UK karışımında azalmıştır.



Şekil 6.6 Karışımların kil yüzdeleri ve plastisite indisi ( $I_p$ ) arasındaki ilişki

### 6.2.1 Aktivite

Aktivite bir kilin plastisite indisinin, içerdiği kil yüzdesine oranı olarak tarif edilmiştir. Şu formülle hesaplanmıştır [36];

$$Ac = \frac{I_p}{\%C} \quad (6.1)$$

burada:

$I_p$ =Plastisite indisi

$\%C$ =Kil içeriği (%)

Kilin aktivitesi 1,25 ten büyükse aktif, 0,75 ile 1,25 arasında ise normal aktivitede, 0,75'ten küçükse inaktif olarak sınıflandırılır ve "Ac" büyüdükçe daha problemli olacağı kabul edilir.

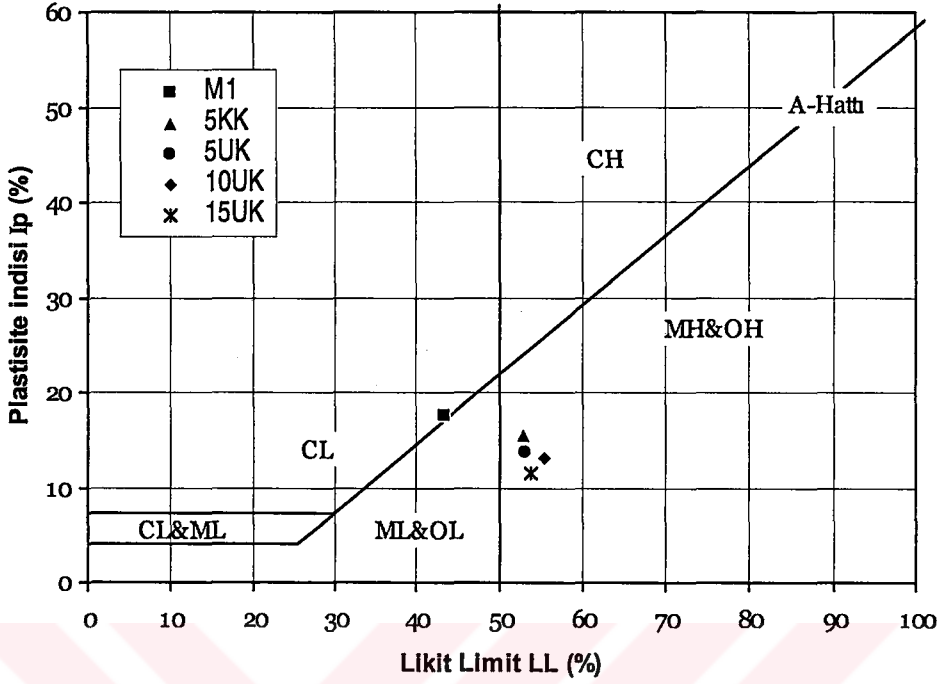
Kontrol numunesine ve diğer karışımlara ait aktivite değerleri Tablo 6.2’de görülmektedir. Karışımların aktivite değeri, uçucu kül miktarı artmasına rağmen sabit bir değerde kalmıştır. Aktivite 5KK da ise en düşük değerini almıştır. Bütün karışımların inaktif olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6.2 Karışımların aktivitesi

Karışımlar	Aktivite (Ac)
M1	0,39
M1+5KK+0UK	0,31
M1+5KK+5UK	0,34
M1+5KK+10UK	0,34
M1+5KK+15UK	0,335

### 6.3 Karışımların Zemin Sınıflandırmaları

Kontrol numunesi kilin, stabilizasyondan önceki zemin sınıfı TS 1500’e göre CL ve AASHTO’ya göre A-2-5 ve plastisitesi yüksek kil zemin olduğu belirlenmiştir. Stabilizasyon sonrasında bütün karışımların zemin sınıfı MH (TS 1500) ve A-7-5 (AASHTO), düşük plastisiteli silt olduğunu göstermiş yani dane çapları kil çapından silt çapına doğru bir büyüme göstermiştir. UK oranı attıkça dane çapı artmamıştır. Karışımlara ait zemin sınıfları Şekil 6.7’de gösterilmektedir.



Şekil 6.7 Stabilize sonrası karışımların plastisite kartındaki yerleri

#### 6.4 Karışımların Fiziksel Özellikleri

Karışımların özgül ağırlıkları, 5KK karışımında artmış, diğer karışımlarda azalmıştır. Özgül ağırlık değerindeki artışın nedeni, kalkerin kil ile yaptığı reaksiyon sırasında molekül yapısına kristalize suyun eklenmesi ve dane yapısının büyümesidir. Sonraki azalma ise karışım içinde UK oranının artmasıyla danelerin daha çok kil parçasıyla ve serbest kireçle reaksiyona girmesidir.

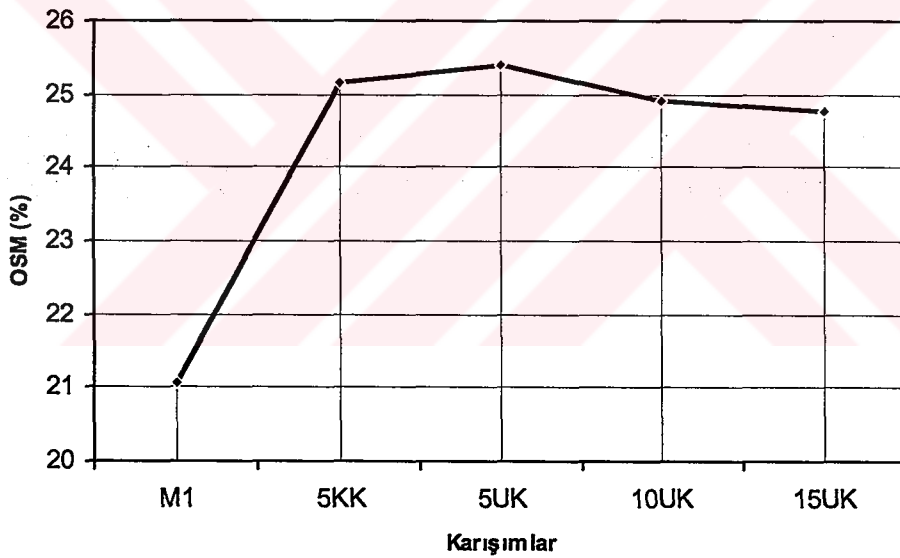
Ateşte kayıp miktarı (kızdırma kaybı) ile malzeme içindeki karbon ve organik madde miktarı ölçülmektedir. UK oranı arttıkça kızdırma kaybının azaldığı belirlenmiştir.

## 6.5 Karışımların Kompaksiyon Özellikleri

Sıkıştırma (kompaksiyon) neticesi UK katkılı karışımlar içinde en yüksek birim hacim ağırlık 5UK'da elde edilmiştir. M1'e katkılar ilave edilirken, kireç katkısı işlenebilirliği arttırmış, UK katkısı bu özelliği daha da arttırmıştır.

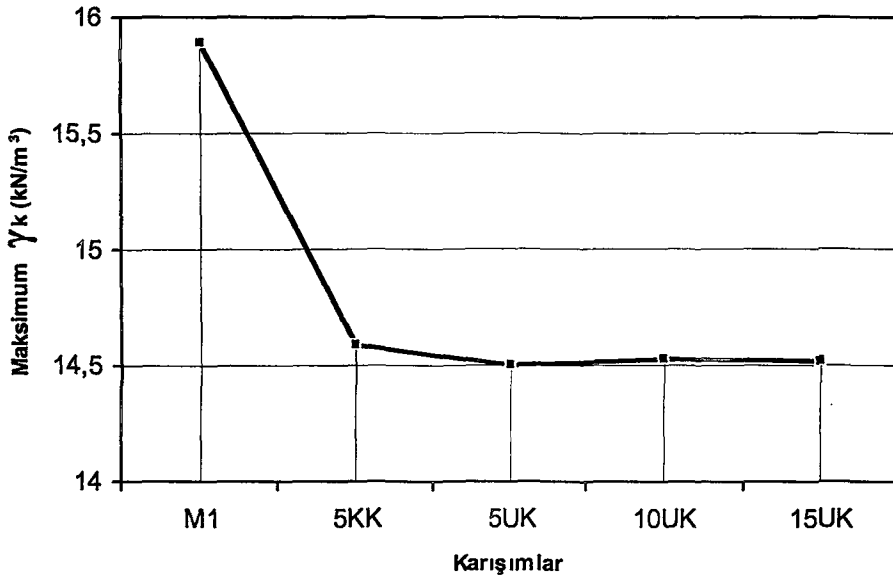
Karışımlardan en yüksek optimum su muhtevası %25,4 ile 5UK karışımında elde edilmiştir. 5UK karışımına kadar maksimum kuru birim hacim ağırlıkları azalmıştır. UK oranı artışı kuru birim hacim ağırlığını arttırmamıştır.

Karışımlara göre OSM ve kuru birim ağırlık değişimleri Şekil 6.8'de ve Şekil 6.9'da gösterilmiştir.



Şekil 6.8 Karışımların optimum su muhtevaları





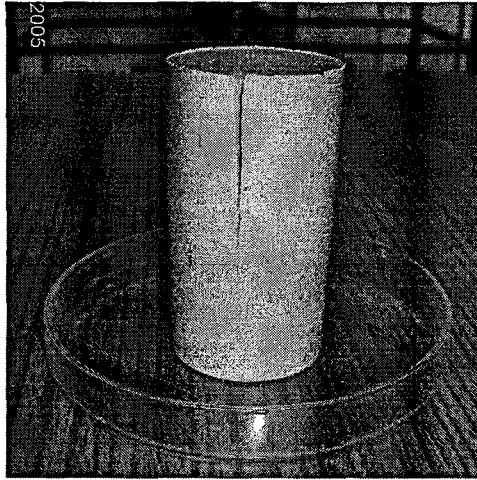
Şekil 6.9 Karışımların maksimum kuru birim ağırlıkları

### 6.6 Karışımların Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

28 gün kür için en yüksek kayma dayanımı 10UK'da elde edilmiştir (Şekil 6.10). Deneyler sırasında en fazla çatlama Şekil 6.11'da görüldüğü gibi 15UK'da meydana gelmiştir. %15 UK katkı miktarı malzemeyi gevrek bir malzeme haline getirmiş ve 15UK karışımı kayma dayanımı düşmüştür.

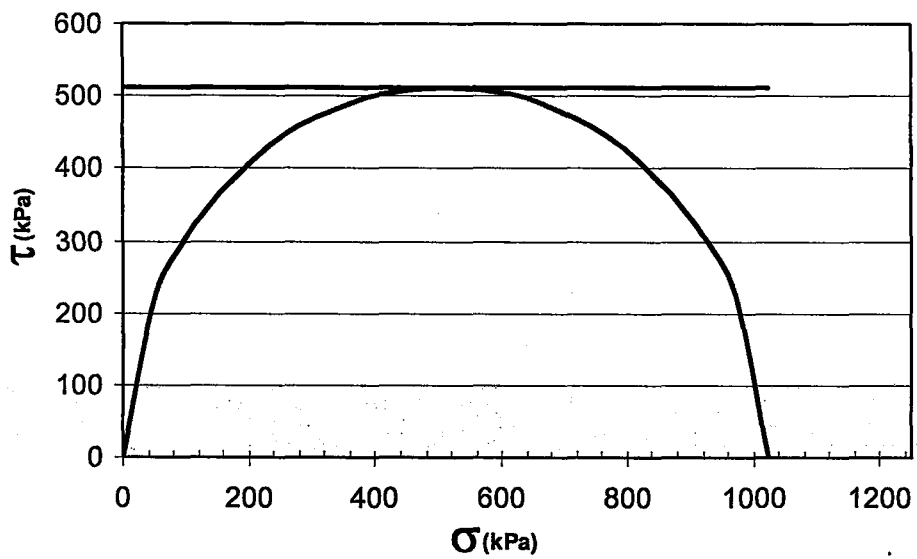


Şekil 6.10 Serbest basınç deneyinden sonra 10UK'da çatlama

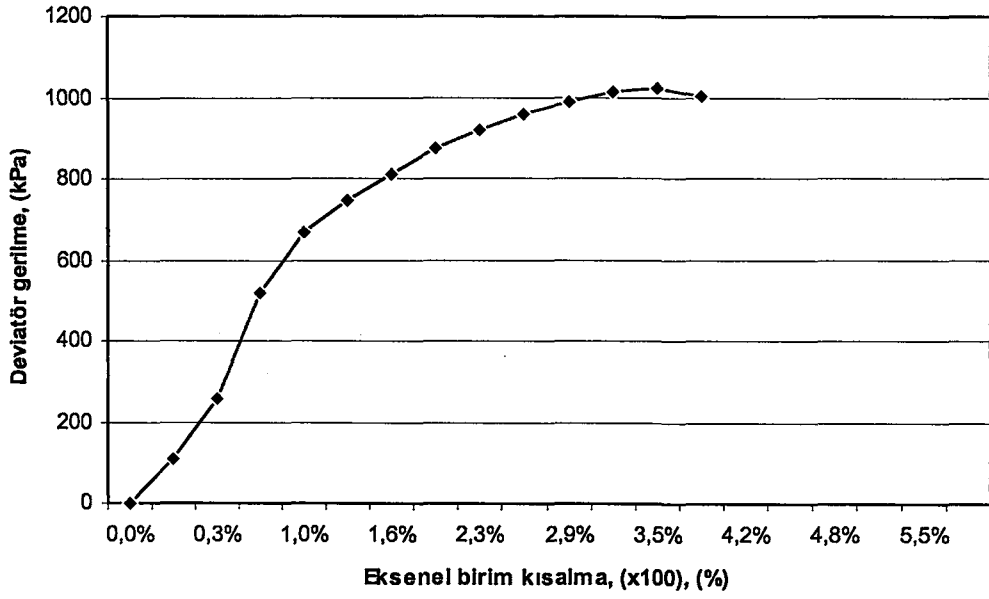


Şekil 6.11 Serbest basınç deneyinden sonra 15UK'da çatlama

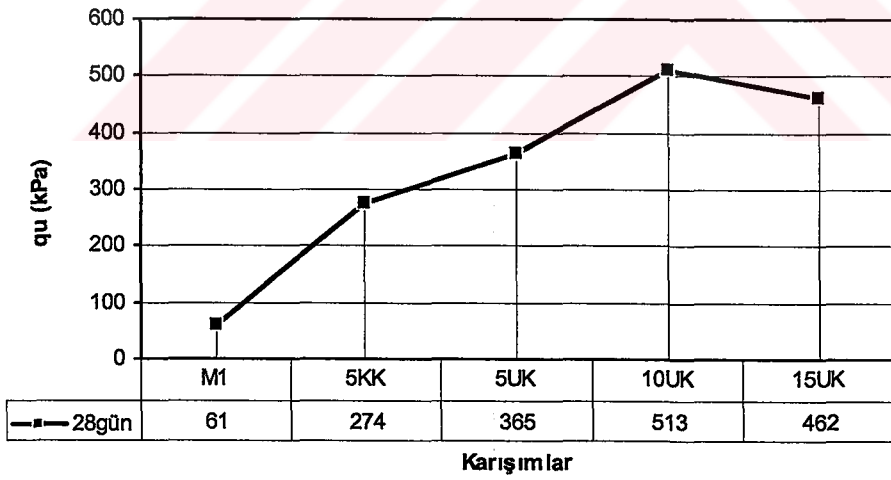
10UK karışımının, serbest basınç deneyi sonucu kayma dayanımı Şekil 6.12'deki grafikten 513 kPa olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.13'de de birim deformasyon eğrisi görülmektedir. 28 gün kür edilmiş karışımlara ait kayma dayanımı grafiği Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.12 10UK'nın serbest basınç deneyinde kayma dayanımı



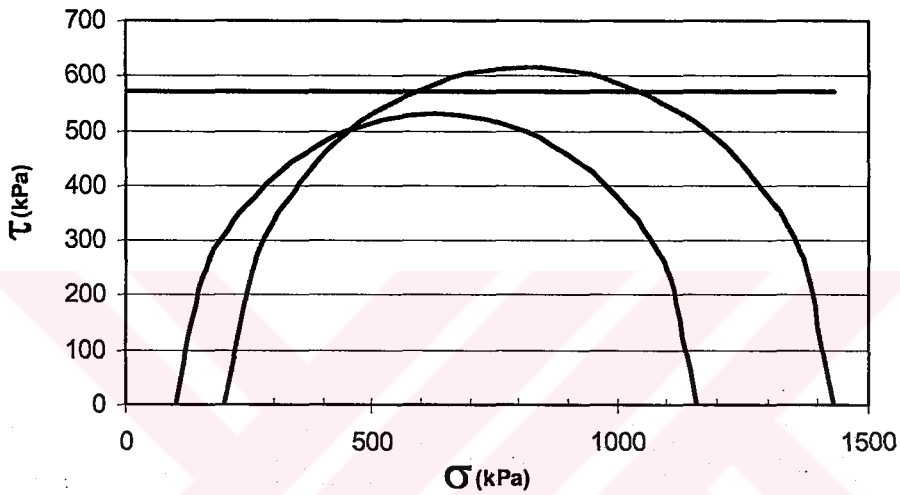
Şekil 6.13 10UK'nın serbest basınç deneyinde eksenel birim boy kısalması



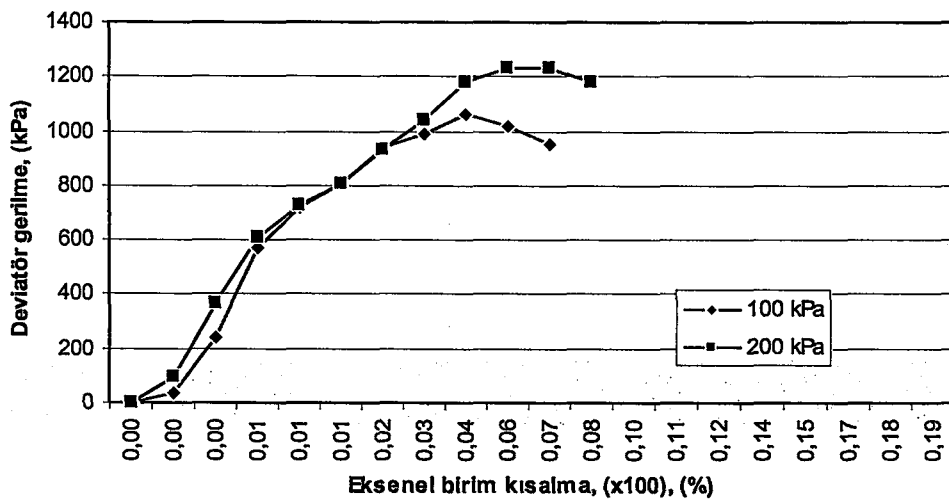
Şekil 6.14 28 gün kürlü karışımların serbest basınç kayma dayanımları

### 6.7 Karışımların Üç Eksenli Basınç Deney Sonuçları

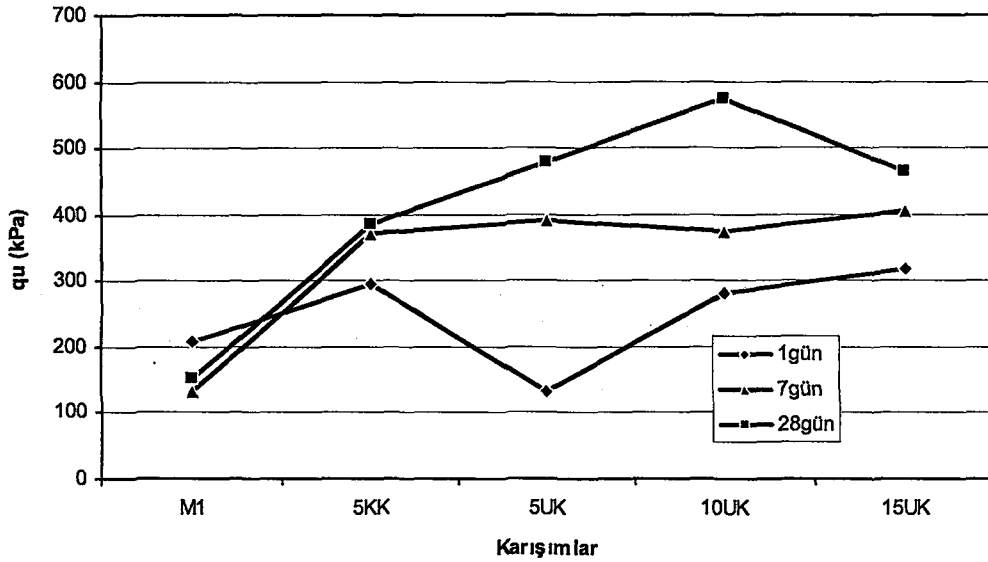
Çeşitli kür sürelerinde bekletilen karışımlardan maksimum kayma dayanımı 28 gün kürlü 10UK'dan elde edilmiştir. 28 gün kürlü 10UK, 100 kPa ve 200 kPa hücre basıncında yapılan deney grafikleri Şekil 6.15'de gösterilmektedir. Şekil 6.16'da deviator gerilmeye karşılık gelen birim boy değişimi verilmiştir. 1, 7 ve 28 gün kür edilmiş karışımlara ait ilişki Şekil 6.17'de verilmiştir.



Şekil 6.15 28 gün kürlü 10UK'nın üçeksenli basınç deneyinde kayma dayanımı



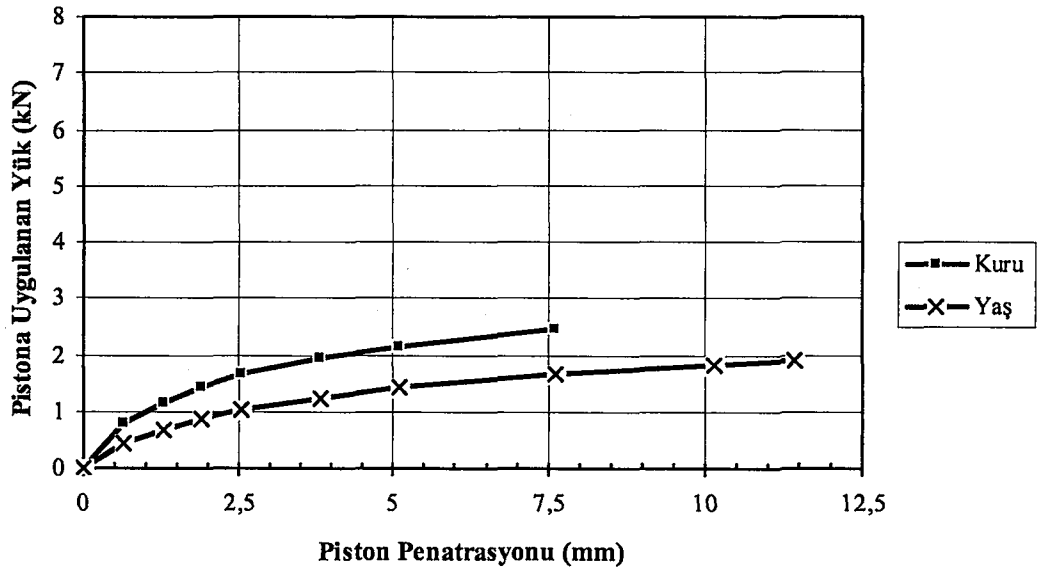
Şekil 6.16 28 gün kürlü 10UK'nın üçeksenli basınç deneyinde eksenel birim boy kısalması



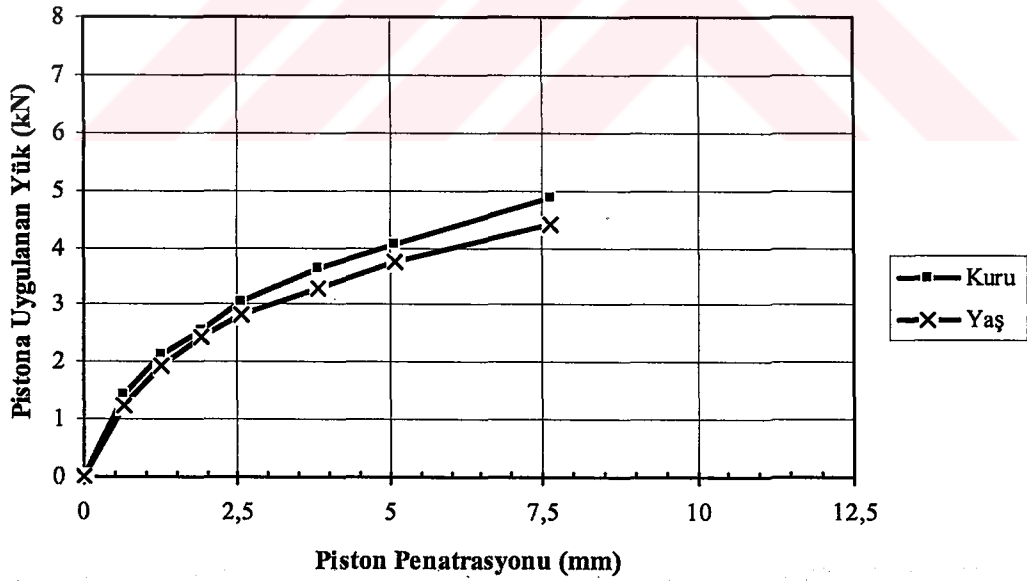
Şekil 6.17 Karışımların çeşitli kür sürelerinde, üçeksenli basınç deneyinde maksimum kayma dayanımları

### 6.8 Karışımların Taşıma Oranları (CBR)

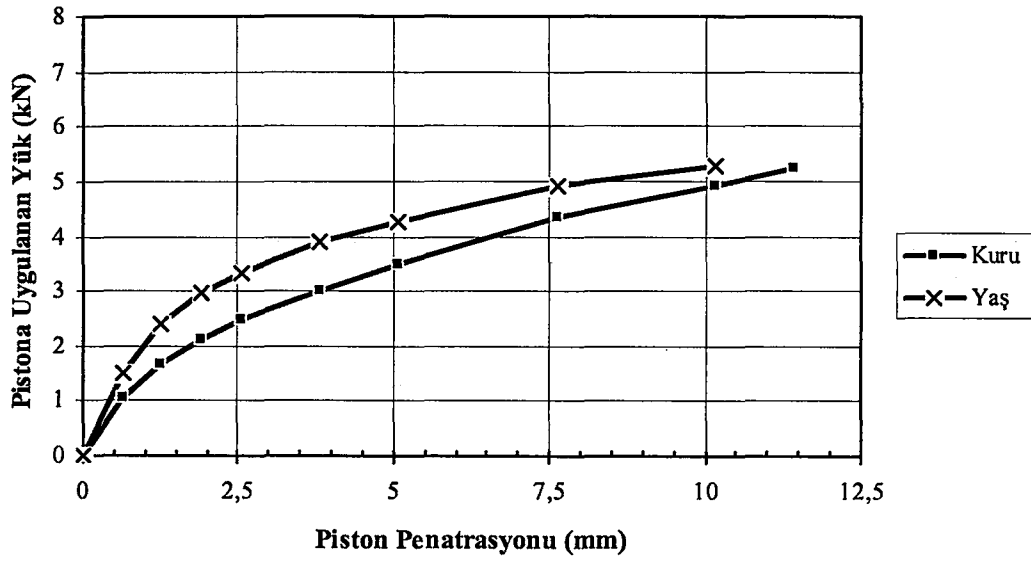
M1 ve 5KK'nın kuru ve yaş CBR grafikleri Şekil 6.18 ve Şekil 6.19 da verilmiştir. Kuru numunelerde, CBR pistonunun 5mm batması için M1'e 2kN, 5KK'ya 4kN'luk basınç uygulanmıştır. UK katkılı kuru karışımlarda (Şekil 6.20, Şekil 6.21, Şekil 6.22), 5mm'lik batma için 5UK, 10UK ve 15UK için 3,5kN, 4,5kN ve 5kN basınç uygulanmıştır. Puzolan maddelerin erken yaş dayanımları düşüktür. Bu sebeple kuru 5UK'nın 5mm batma için basınç değeri, kuru 5KK basınç değerinden daha yüksek çıkmıştır. Karışımlara ait CBR grafikleri Şekil 6.18, Şekil 6.23 arasında gösterilmiştir.



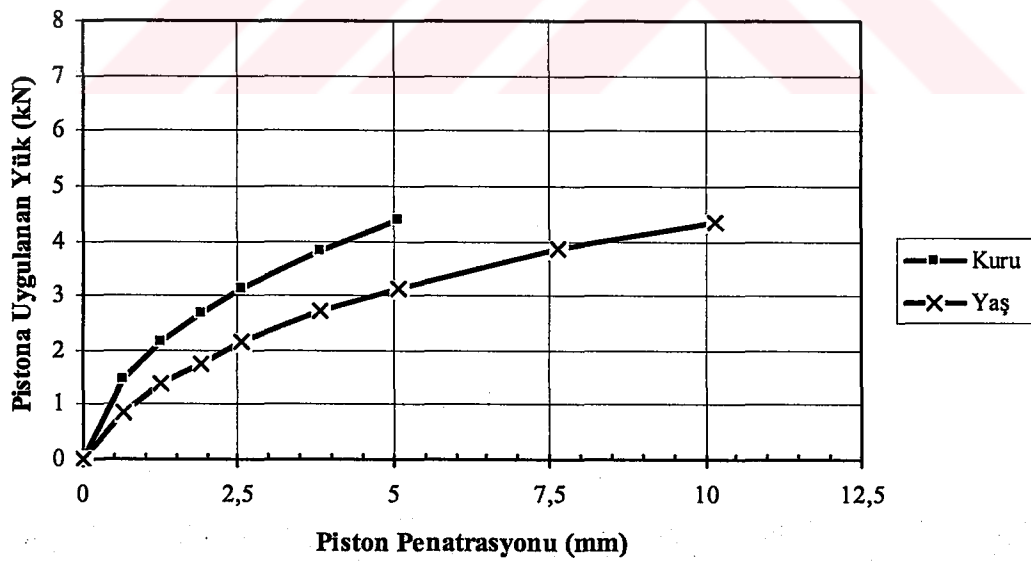
Şekil 6.18 M1 kili için CBR grafiği



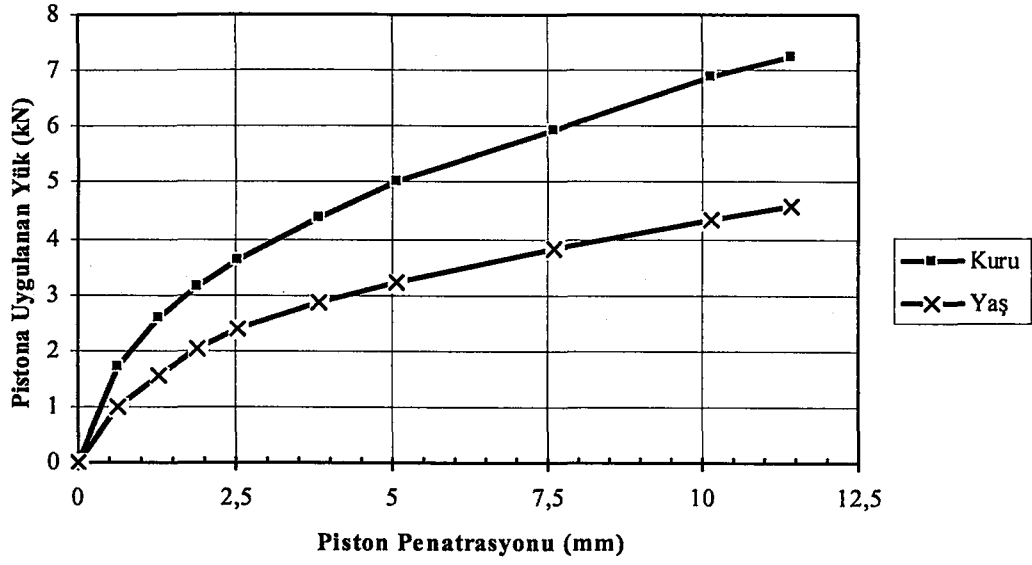
Şekil 6.19 5KK karışımı için CBR grafiği



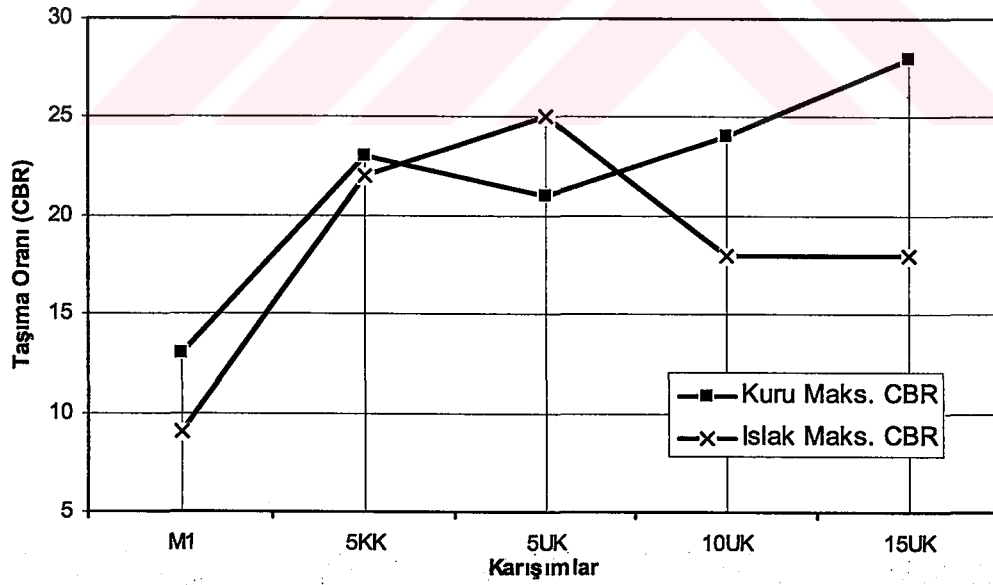
Şekil 6.20 5UK karışımı için CBR grafiği



Şekil 6.21 10UK karışımı için CBR grafiği



Şekil 6.22 15UK karışımı için CBR grafiği

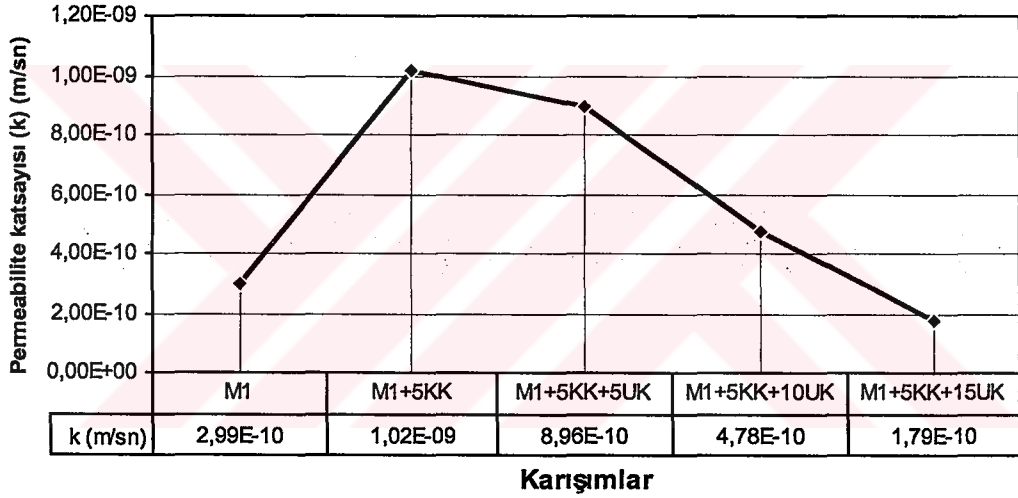


Şekil 6.23 Islak ve kuru durumdaki karışımların maksimum CBR değerleri



### 6.9 Karışımların Permeabilite Katsayıları (k)

Deneyslerde sabit seviyeli permeabilite deney seti kullanılmıştır. Karışımlar standart kompaksiyon aletinde sıkıştırılmış, deney düzeneği içindeki yerine yerleştirilmiştir. Her deneyde, karışımlara 1,85m su sütunu basınç uygulanmıştır. Çıkış borusundan su geldiği andan, sabit ağırlıkta su sızıntısı elde edilene kadar beklenmiş sonra ölçümler yapılmıştır. Karışımlar içindeki en küçük permeabilite katsayısının M1'e ait olduğu belirlenmiştir. Elde edilen değerler ileriki kür yaşında tekrar ölçülmemiş sadece karışımların ilk günlerindeki değerler alınmıştır. Karışımlara ait permeabilite ilişkileri Şekil 6.24'de verilmiştir.



Şekil 6.24 Permeabilite katsayıları

## BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada zemin olarak yüksek kaolinit içerikli M1 kili kullanılmıştır. Bu kil içerisine %5 kireç ve değişik oranlarda uçucu kül katılmış ve bu karışımlara değişik sürelerde kür uygulanmıştır. Bu stabilizasyondan sonra karışımlar üzerinde deneyler yapılmış ve uçucu küllerin zemin stabilizasyonu üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

Hidrometre analizi sonucunda zemine katılan katkı maddesi oranları arttıkça silt oranı artmış, kil oranları azalmıştır. Ardışık karışımlar arasında kil yüzdesi, 5KK ve 5UK arasında %6 azalırken, 10UK ve 15UK arasında %4 azalmıştır. Karşılaştırma numunesi (M1) kil miktarı % 48, en düşük kil miktarı %37 ile 15UK'da elde edilmiştir.

28 gün kür uygulanmış numuneler üzerinde yapılan ıslak eleme deneyi sonucunda, 75µm elek üstünde kalan malzeme miktarında bir değişim gözlenmemiştir.

Karışımların 28 gün kür sonunda belirlenen kıvam limitlerine göre katkı oranları arttıkça plastisite indisleri azalmıştır.

Numune hazırlama aşamasında, 5KK'da işlenebilirliğin azaldığı, UK ilaveli karışımlarda kül oranı arttıkça işlenebilirliğin arttığı belirlenmiştir. Ancak %10 UK karışımının plastikliği bir miktar azalmış iken, %15 UK karışımı non-plastik hale gelmiştir. Bu durum ilk olarak 1 ve 4 gün kürlü CBR numunelerinde sonrada 28 gün kürlü serbest basınç numunelerinde görülmüştür.

M1'e göre özgül ağırlık, 5KK'da artmış, UK'lü karışımlarda kül oranı arttıkça azalmıştır.

Karışımların ateşte kayıp miktarlarında, UK katkı oranı arttıkça azalma gözlenmiştir.

Optimum su muhtevası M1'de %21,07 değerinden, 5KK'da %25,15 değerine, 5UK karışımında ise %25,39 değerine yükselmiştir. Ancak 10UK ve 15UK karışımlarında sırasıyla %24,90 ve %24,78 değerlerine düşmüştür.

En büyük maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $15,89 \text{ kN/m}^3$  ile M1, katkılı karışımlarda  $14,59 \text{ kN/m}^3$  ile 5KK'da ve 5UK, 10UK ve 15UK karışımlarda kuru birim hacim ağırlık olarak birbirine yakın değerler ( $14,50 \text{ kN/m}^3$ ) elde edilmiştir.

Mask1 kilinin dayanımını gösteren CBR değeri 12 iken, optimum su içeriğinde hazırlanan 5KK katkılı karışımda %92 oranında artarak 23 olmuş, 5UK katkılı karışımda ise %108 artarak 25 olmuştur. CBR deneyi kür süresi arttırılmış karışımlar üzerinde yapılırsa dayanımın artacağı düşünülmektedir.

Serbest basınç ve üçeksenli deneyinde en iyi dayanım 10UK'da elde edilmiştir.

Permeabilite katsayıları karışımlarda küçükten büyüğe 15UK, M1, 10UK, 5UK, 5KK şeklinde tespit edilmiştir. Su debisi en çabuk 15UK'da, en geç ise M1'de düzene girmiştir.

5UK ve 10UK karışımı ile yapılan stabilizasyon özellikleri diğer karışımlara göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

UK'nın 90 ve 180 gün kürlü numunelerin stabilizasyonuna ne gibi etkilerde bulunacağı araştırılmalıdır.

%15'den fazla UK katkılı karışımlar üzerindeki etkileri araştırılmalıdır.

Bu çalışmada karışımlara katılan kireç katkı oranı %5 olarak sabit tutulmuştur uçucu külün %10 ve %15 kireç katkılı karışımlara etkisi araştırılmalıdır.

Karışımların ilerleyen kr sürelerinde permeabilite katsayıların değişeceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada sonuç olarak uçucu külün, kaolinit içeriği fazla zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabileceği ve böylece kl atığın Türkiye ekonomisine katkı sağlayacağı ve evre kirliliğini azaltacağı tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] [www.yapitr.com/images/Enerji](http://www.yapitr.com/images/Enerji), ERENGEZGİN, Ç., Yasamin Cekirdegi, 2001
- [2] TÜRKER, P., ERDOĞAN, D., KATNAŞ, F. ve YEĞİNOBALI, A., Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TÇMB, Ar-Ge Enstitüsü, S.i-ii, Ankara, 2004
- [3] ÖNALP, A., İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi, Cilt II , S.1145, 1202-1209, KTÜ Basımevi, Trabzon, 1983
- [4] YEĞİNOBALI, A. ve ERTÜN, T., Çimentolarda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar, TÇMB, Ar-Ge Enstitüsü, S.18, Ankara, 2004
- [5] BALTA, İ., Doğu Karadeniz Bölgesi Topraklarının Çimento ve Kireçle Stabilizasyonu, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1984
- [6] TÜDEŞ, E., Zeminlerin Kireç ve Çimento Katkısı İle Stabilizasyonu, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1996
- [7] WASTİ, Y., Uçucu Küllerin Geoteknik Uygulamalarda Kullanımı, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler, S.37-44, 1993
- [8] JOSHI, R.C. ve NAGARAJ, T.S., Fly Ash Utilization for Soil Improvement, Environmental Geotechnics and Problematic Soils and Rocks, Balkema Publication, S.15-25, 1986
- [9] JOSHI, R.C., DUNCAN, D.M. ve McMASTER, H.M., New and Conventional Engineering Uses of Fly Ash, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Division, Sayı: 101, S.609-619, 1975
- [10] BOWDERS, J.J., ÜSMEN, M. ve GIDLEY, J.S., Stabilized Fly Ash for Use as Low-Permeability Barriers, ASCE, Geotechnical Practice for Waste Disposal, Geotechnical Special Publication, Sayı: 13, S.320-333, 1987
- [11] EDİL, T.B., BERTHOUEX, P.M. ve VESPERMAN, K.D., Fly Ash as a Potential Waste Liner, ASCE, Geotechnical Practice for Waste Disposal, Geotechnical Special Publication, Sayı: 13, S.447-461, 1987

- [12] LEE, S.W. ve FISHMAN, K.L., Improved Resilient Modulus Realized with Waste Product Mixtures, ASCE, Geotechnical Practice for Waste Disposal, Geotechnical Special Publication, Sayı: 13, S.1356-1367, 1987
- [13] MAHER, M.H., BUTZIGER, J.M., DISALVO, D.L. ve OWEIS, I.S., Lime Sludge Amended Fly Ash for Utilization as an Engineering Material, ASCE, Fly Ash for Soil Improvement, Geotechnical Special Publication, Sayı: 36, S.73-88, 1993
- [14] ÖZBAYOĞLU, F.U., Uçucu Küllerin, Bentonit, Kireç ve Çimento Katkılarıyla Kumlu Zeminlerin Stabilizasyonlarında Kullanımı, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler, S.103-118, 1993
- [15] FERGUSON, G., Use of Self-Cementing Fly Ash as a Stabilization Agent, ASCE, Fly Ash for Soil Improvement, Geotechnical Special Publication, Sayı: 36, S.1-14, 1993
- [16] DAY, R.W., Geoteknik Deprem Mühendisliği El Kitabı, Çeviren; MOLLAMAHMUTOĞLU, M., KAYABALI, K., Gazi Kitapevi S.437, 562-569, 571, 2004
- [17] KRAMER, S.L., Geoteknik Deprem Mühendisliği, Çeviren: KAYABALI, K., Gazi Kitapevi, S.271, 2003
- [18] YILDIRIM, S. Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı, Birsen Kitapevi, S.440-446, 2002
- [19] CONNER J.R., Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes, Van Nostrand Reinhold, New York, NY 1990
- [20] ÖZAYDIN, K., Zemin Mekaniği, 1. Baskı, Mesa Matbaacılık ve Yayıncılık Ltd. Şti., S.381-385, İstanbul, 1989
- [21] ARAS, H., ZÜBEYDE, B., BAYSAL, A.C., DEMİRER, G., Aliğa Özelinde Ülkemizde Termik Santraller ve Çevre, Çevre Mühendisleri Derneği, S.59-61, Kozan Ofset, Ankara 1992
- [22] KOYUNCU, H., Stabilizasyon/Solidifikasyon Yöntemiyle İyileştirilmiş Petrollü Sondaj Atıklarının Fiziko-Kimyasal Mikro-Yapısal ve Geoteknik Özellikleri, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, 1998
- [23] DAS, B.M., Principles Foundation Engineering, Civil Engineering Department, The University of Texas, S.531, 1985
- [24] ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM standards, No.4, 1998

- [25] TS 639 Uçucu Küller, TSE, 1998
- [26] MARTIN, J.P., FRANCIS, J.B. ve ROBINSON, W.T., Stabilized petroleum waste interaction with silty clay subgrade. Bölüm 16 in Petroleum Contaminated Soils, Cilt 2, Technical Editor C.E. Bell, S.177-197, Lewis Publisher, 1989
- [27] Akdeniz Maden ve Çimento San.A.Ş., Rapor no: 2004-117, Bursa Orhaneli Termik santrali separatör işletmesi, analiz tarihi: 02.11.2004
- [28] TS EN 450 Uçucu Kül (Betonda kullanılan) Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü, TSE, 1998
- [29] ÖNEM Y., Sanayi Maddeleri, Kozan Ofset Matbaacılık, S.236-239 Ankara, 1997
- [30] TS 4022 Kireçler (Söndürülmüş), TSE, 1993
- [31] TS 1900 İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuar Deneyleri, TSE, Ankara, 1987
- [32] ASTM D854 Standard Test Method For Specific Gravity of Soil Solids by Water Piknometre, Annual Book of ASTM Standards, 2000
- [33] AYTEKİN M., Deneysel Zemin Mekaniği, Akademi Yayın Evi, Trabzon, 2000
- [34] TS 1500 İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, TSE, Ankara, 1987
- [35] HORNECK, D.A., HORT, T.M., TOPPER, K., ve KOEPSSELL, B., Methods of soil analysis, used in the soil testing laboratory at Oregon State University, SM 89:4-16, 1989
- [36] ÖNALP, A., Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekaniği, Sakarya Üniversitesi Yayın No: 27, Sakarya, 1997

## ÖZGEÇMİŞ

Bu tezi hazırlayan Ahmet Tuna Cömert 31 Mart 1967 tarihinde Ankara'da doğdu. Almanya'da başladığı ilköğrenim hayatını Ankara'da tamamladı. Ankara İnşaat Teknik Lisesi alt yapı bölümünü bitirerek, 1987 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi bölümüne girdi. 1991 yılında üniversiteden bölüm birincisi olarak mezun oldu. 2003 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi bölümüne yüksek lisans öğrencisi olarak kaydını yaptırdı. Orta derecede İngilizce ve Almanca bilmekte, evli ve iki çocuk babasıdır.

