

**İNCE KUM ZEMİNLERDE UÇUCU KÜLÜN ZEMİN
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Elanur YAZICI



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNCE KUM ZEMİNLERDE UÇUCU KÜLÜN ZEMİN ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Elanur YAZICI
0000-0001-6688-0264

Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Elanur YAZICI tarafından hazırlanan “İNCE KUM ZEMİNLERDE UÇUCU KÜLÜN ZEMİN ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER

- Başkan** : Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER İmza
0000-0003-3735-9554
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Talha GEZGİN İmza
0000-0002-9725-6015
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Doç. Dr. Eyübhan AVCI İmza
0000-0001-7206-0158
Bursa Teknik Üniversitesi,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

.././.....

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

09/02/2023

Elanur YAZICI

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Danışman Adı-Soyadı
Tarih

Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER
09.02.2023

Öğrencinin Adı-Soyadı
Tarih

Elanur YAZICI
09.02.2023

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İNCE KUM ZEMİNLERDE UÇUCU KÜLÜN ZEMİN ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Elanur YAZICI

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER

Son yıllarda sanayileşme ve kentleşmedeki gelişmeler neticesinde enerji ihtiyacında artış görülmektedir. Artan enerji ihtiyacını karşılamak için kurulan termik santrallerde yanan kömür sonrasında atık olarak ortaya uçucu kül çıkmaktadır. Puzolanik özellik gösteren uçucu küller inşaat sektöründe farklı alanlarda kullanılmakla birlikte geoteknik mühendisliğinde çevre sorunlarını azaltması ve ekonomik olması nedeniyle zemin iyileştirmesinde önemli bir alternatif olarak görülmektedir. Bu nedenle, günümüzde bu atık malzemenin değerlendirilmesi ve yeniden kullanılmasına yönelik çalışmalar önem kazanmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı uçucu kül katkısının ince kum zeminin geoteknik özelliklerine etkisini araştırmak ve bu atık malzemenin yeniden kullanılabilirliğini değerlendirmektir. Kum zemine ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında stabilizatör olarak uçucu kül ve sabit %3 oranında aktivatör olarak çimento katılarak numuneler hazırlanmıştır. Bu amaçla, öncelikle standart kompaksiyon deneyleri ile numunelerin optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri bulunmuştur. Daha sonra kendi optimum su içeriklerinde hazırlanan kum numuneleri üzerinde direkt kesme kutusu, CBR ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. Direkt kesme kutusu deneylerinde numuneler %30 ve %80 rölatif sıklıklarda hazırlanmıştır ve rölatif sıklığın içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerine etkisi değerlendirilmiştir.

Yapılan deneyler neticesinde ince kum zemine stabilizatör olarak uçucu kül ve aktivatör olarak eklenen çimento katkısının kumun içsel sürtünme açısı, kohezyon, CBR değerine pozitif olarak etki ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca uçucu kül ve çimento katkısı ile kum zeminin permeabilitesi de azalarak iyileşme göstermiştir. Karışımlarda aktivatör olarak yalnızca %3 oranında bulunan çimentonun ince kum zeminin iyileştirilmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Sonuç olarak bu çalışmada ince kum zemine eklenen uçucu kül katkısının kumun geoteknik özelliklerinde iyileşme sağladığı anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnce kum, Zemin iyileştirme, Kesme kutusu deneyi, CBR, Uçucu kül, Çimento
2023, xii + 79 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FLY ASH ON SOIL PROPERTIES OF FINE SAND SOILS

Elanur YAZICI

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Yeşim Sema ÜNSEVER

In recent years, as a result of developments in industrialization and urbanization, there has been an increase in energy demand. Fly ash emerges as waste after burning coal in thermal power plants established to meet the increasing energy need. Fly ash, which has pozzolanic properties, is used in different areas in the construction sector, but it is seen as an important alternative as a soil improvement method in geotechnical engineering because it reduces environmental problems and it is economical. For this reason, studies on the evaluation and reuse of this waste material have gained importance in recent years.

The main purpose of this study is to investigate the effect of fly ash additive on the geotechnical properties of fine sand soil and to evaluate the reusability of this waste material. Samples were prepared by adding 5%, 10%, 15%, 20% and 25% by weight fly ash as stabilizer and fixed 3% cement as activator to the sand soil. For this purpose, first optimum water content and maximum dry unit weight values of the samples were found by standart compaction experiments. Then, direct shear box, CBR and permeability tests were performed on the sand samples prepared in their optimum water content. At the direct shear box experiments, the samples were prepared at 30% and 80% relative density, and the effect of the relative density on the internal friction angle and cohesion values was evaluated.

As a result of the experiments, it was observed that fly ash as stabilizer and cement additive added as activator to the fine sand soil had a positive effect on the internal friction angle, cohesion and CBR value of the sand. In addition, the permeability of the sand soil decreased and improved with the admixture of fly ash and cement. It has been observed that the cement, which is only 3% as an activator in the mixtures, has a significant effect on the improvement of the fine sand soil. As a result, in this study, it was understood that the additive of fly ash added to the fine sand soil improved the geotechnical properties of the sand.

Key words: Fine sand, Soil improvement, Direct shear box test, CBR, Fly ash, Cement
2023, xii + 79 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin en başından beri her adımda bana desteğini, bilgi ve tecrübesini aktaran, çalışmalarına yön veren danışman hocam, sayın Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER'e çok kıymetli katkılarından dolayı saygılarımı sunar, teşekkür ederim.

Tez sürecinde desteğini ve yardımını esirgemeyen Arş. Gör. Burcu AYTEKİN'e,

Tez çalışması kapsamında deneylerin bir bölümünün yapılmasında laboratuvar imkânlarını sunan PROTEST Yapı Araştırma ve Test Merkezi AŞ'ye ve laboratuvar çalışanlarına,

Bu süreçte manevi destekleriyle bana huzurlu hissettiren ve güç veren kıymetli arkadaşlarıma,

Hayatım boyunca her zaman sevgi ve ilgilerini gösteren, her adımda maddi ve manevi destekleri ile yanımda olan çok değerli anneme ve babama çok teşekkür ederim.

Elanur YAZICI
09/02/2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Zemin İyileştirme.....	3
2.2. Zemin İyileştirme Yöntemleri	4
2.2.1. Mekanik İyileştirme	4
2.2.2. Kimyasal İyileştirme	8
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	24
3.1. Kullanılan Malzemeler	24
3.1.1. Zemin Özellikleri	25
3.1.2. Çimento	28
3.1.3. Uçucu Kül.....	28
3.2 Yöntem.....	30
3.2.1. Özgül Ağırlık Deneyi	30
3.2.2. Standart Proktor Deneyi	31
3.2.3. Kesme Kutusu Deneyi.....	32
3.2.4. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi.....	36
3.2.5. Permeabilite Deneyi	38
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	41
4.1. Standart Proktor Deney Sonuçları.....	41
4.2. Kesme Kutusu Deney Sonuçları	45
4.2.1. %30 Rölatif Sıkılık Sonuçları	45
4.2.2. %80 Rölatif Sıkılık Sonuçları	48
4.3. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR).....	51
4.4. Permeabilite Deney Sonuçları	57
5. SONUÇ.....	59
KAYNAKLAR.....	63
EKLER.....	69
EK 1 Standart Proktor deneyi sonucu (örnek).....	70
EK 2 CBR sonuçları (örnek)	71
EK 3 Kesme kutusu deney sonuçları	72
ÖZGEÇMİŞ.....	79

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
CaCO ₃	Kalsiyum karbonat
Ca(OH) ₂	Kalsiyum hidroksit
CaO	Kalsiyum oksit
SiO ₂	Silisyum oksit
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
C ₂ S	Dikalsiyum silikat
C ₃ A	Trikalsiyum alüminat
C ₄ AF	Tetrakalsiyum alumino ferrit
Ca ⁺²	Kalsiyum iyonu
CaSO ₄ .2H ₂ O	Kalsiyum sülfat dihidrat
MgO	Magnezyum oksit
SO ₃	Kükürt trioksit
K ₂ O	Potasyum oksit
Na ₂ O	Sodyum oksit
e	Boşluk oranı
emax	Maksimum boşluk oranı
emin	Minimum boşluk oranı
τ	Kayma gerilmesi
Dr	Rölatif sıkılık
γ _{kmaks}	Maksimum kuru birim hacim ağırlık
w _{opt}	Optimum su muhtevası
Cu	Üniformluk katsayısı
Cc	Derecelenme katsayısı
D10	Efektif dane çapı
φ	İçsel sürtünme açısı
c	Kohezyon
k	Permabilite katsayısı

Kısaltmalar	Açıklama
ASTM	American Society for Testing and Materials
K	Kum
C	Çimento
UK	Uçucu kül
C-S-H	Kalsiyum silika hidrat
CBR	Kaliforniya taşıma oranı
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
İLA	International Lime Association

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Vibroflotasyon ile sıkıştırma işlemi (Braja, 1999).....	6
Şekil 2.2.	Taş kolon uygulama aşamaları (Özaydın, 2012).....	7
Şekil 2.3.	Jet Grout işlemi (Burke, 2004).....	7
Şekil 2.4.	Uçucu kül ve taban külünün oluşum aşamaları (Tangüler ve ark, 2014).....	14
Şekil 3.1.	Kum zeminin dane boyutu dağılım eğrisi.....	26
Şekil 3.2.	Kum numune.....	27
Şekil 3.3.	Deneyde kullanılan uçucu kül ve çimento.....	28
Şekil 3.4.	Uçucu kül ve çimentonun dane boyut dağılım eğrisi.....	29
Şekil 3.5.	Piknometre+Su+Numune ağırlığının belirlenmesi.....	31
Şekil 3.6.	Deneyde kullanılan kalıp ve tokmak	32
Şekil 3.7.	Kesme kutusu deney ekipmanları ve kesme kutusu deneyi için hazırlanan numunenin görünümü.....	35
Şekil 3.8.	Kesme kutusu deney cihazı ve kesme hücrelerine yerleştirilen kesme Kutusu.....	35
Şekil 3.9.	K3Ç10UK numunesinin 28 günlük küre hazır duruma getirilmesi	37
Şekil 3.10.	CBR deney düzeneği ve K3Ç10UK karışımının 28 gün kür sonunda CBR testi sonrası görünüşü.....	37
Şekil 3.11.	Permeabilite deney düzeneği.....	40
Şekil 4.1.	Numunelerin kompaksiyon grafikleri	43
Şekil 4.2.	Uçucu kül ve çimento katkısının maksimum kuru birim hacim ağırlığa etkisi	44
Şekil 4.3.	Uçucu kül ve çimento katkısının optimum su içeriğine etkisi.....	44
Şekil 4.4.	%30 sıklık için numunelerin içsel sürtünme açısı değerleri	46
Şekil 4.5.	%30 sıklık için kohezyon değerleri	46
Şekil 4.6.	%30 rölatif sıklıkta kum ve K3Ç10UK numunesi için kayma gerilmesi yatay deformasyon eğrisi	48
Şekil 4.7.	%80 rölatif sıklık için numunelerin içsel sürtünme açısı değerleri	49
Şekil 4.8.	%80 sıklık için kohezyon değerleri	50
Şekil 4.9.	%80 sıklıkta Kum ve K3Ç10UK numuneleri için kayma gerilmesi- yatay deformasyon eğrisi	51
Şekil 4.10.	Deney karışımlarının 7 gün kür sonrası kuru CBR sonuçları	53
Şekil 4.11.	Deney karışımlarının 28 gün kür sonrası kuru CBR sonuçları	53
Şekil 4.12.	Deney karışımlarının 7 gün kür sonrası ıslak CBR sonuçları	54
Şekil 4.13.	Deney karışımlarının 28 gün kür sonrası ıslak CBR sonuçları	54
Şekil 4.14.	7 gün kür sonrası %3Ç ve UK katkılı numuneler	56
Şekil 4.15.	28 gün kür sonrası %3Ç ve UK katkılı numuneler	56
Şekil 4.16.	Permeabilite deney sonuçları	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Deneysel program çerçevesinde hazırlanan numuneler.....	25
Çizelge 3.2. Kum zeminin indeks parametreleri.....	27
Çizelge 3.3. Çimento ve uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	29
Çizelge 3.4. Kesme kutusu deneylerinde incelenen parametreler.....	33
Çizelge 3.5. CBR deneylerinde incelenen parametreler.....	36
Çizelge 4.1. Standart Proktor deneyi sonuçları.....	42
Çizelge 4.2. Permeabilite deney sonuçları.....	57

1. GİRİŞ

Üst yapıdan gelen yükler temeller ile zemine aktarılırlar ve zeminlerin üzerine gelen bu yükleri güvenli bir şekilde taşıması gerekmektedir. Günümüzde nüfus artışı ve kentleşmenin gelişmesi ile taşıma gücü, sıvılaşma, oturma, permeabilite, şişme v.b sebeplerden dolayı yetersizlikleri olan zeminlerde de inşaat yapmak zorunlu hale gelmiştir. Bu sebepten son yıllarda zemin iyileştirme uygulamaları giderek önem kazanmaya başlamıştır ve bu sayede inşaat yapımına uygun olmayan sahaların iyileştirilerek kullanımı mümkün olmaktadır.

Zemin iyileştirme uygulamaları ile zeminlerin taşıma gücü, sıvılaşma, oturma, permeabilite, şişme gibi birçok problemlerinin çözümü gerçekleştirilebilmektedir. Zeminlerde bulunan bu problemlerden herhangi biri veya birkaçının farklı yöntemlerle istenen mühendislik özelliklerine sahip olması için yapılan işlemlere zemin iyileştirme denir. Mevcut literatürde zemin iyileştirme yöntemleri yüzeysel ve derin iyileştirme, mekanik ve kimyasal iyileştirme ya da katkılı ve katkısız iyileştirme olmak üzere birçok farklı şekilde sınıflandırılarak sunulmuştur.

Zemin iyileştirmede pek çok malzeme kullanılabilir ve her zemin türü için en makul stabilizatörü belirlemek amacıyla araştırmalar sürmektedir fakat tüm koşullarda kullanılabilen olağanüstü bir stabilizatör bulunmamaktadır. En uygun stabilizatörün tercihi esasen yerel mevcudiyete, ekonomiye ve biraz da toplumsal kabule bağlıdır. (Mukerji ve Stulz, 1993).

Uçucu küller iyileştirmelerde, doğal olarak meydana gelen ya da karıştırılmış agrega sistemlerinde hava boşluklarını azaltmak amacıyla dolgu ya da puzolan görevi görür (Little ve ark., 1987). Termik santrallerde enerji elde etmek için yakılan kömürden atık bir ürün olarak ortaya çıkan uçucu küller zemin iyileştirme uygulamaları için verimli bir potansiyel oluşturmaktadır. Atık ürün olarak elde edilen uçucu küllerin çevre kirliliğine neden olmaması için doğaya salınmayıp depolanması gerekmektedir. Uçucu küllerin depolanması durumunda ise depo masrafı ortaya çıkmaktadır ve bu da ekonomik açıdan istenilen bir durum değildir. Uçucu küllerin geoteknik mühendisliğinde zemin iyileştirme

uygulamalarında kullanımı ile ekonomik açıdan problem teşkil eden depo masrafının ve depolanmayıp doğaya salınması halinde ise oluşacak çevre kirliliğinin önüne geçilebilmektedir.

Geoteknik mühendisliğinde killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin uçucu kül benzeri kimyasal katkılarla iyileştirilmesi uzun zamandan beri üzerinde çalışılan bir uygulamadır. Son yıllarda ise kum zeminlerin uçucu küller ile iyileştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Literatürde kum zeminlerin uçucu kül ile iyileştirilmesi konusunda daha çok çalışma yapılması gerektiği ile ilgili öneriler dikkate alınarak bu tez çalışmasında uçucu külün ince kum zeminlerin geoteknik özelliklerine etkisinin incelenmesi amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında kum zeminin iyileştirilmesi için gerekli olan uçucu kül miktarının ve uçucu küle beraber aktivatör olarak kullanılan çimentonun etkisini daha detaylı incelemek için; ince kum zemine ağırlıkça belirli oranlarında stabilizatör olarak uçucu kül ve sabit bir oranda aktivatör olarak çimento katılarak numuneler hazırlanmıştır.

Standart Proktor deneyleri ile optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri tayin edilen katkısız kum ve katkılı numuneler üzerinde kesme kutusu (kürsüz), 7 ve 28 gün kür uygulanarak taşıma oranının tayini (CBR) ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. Karışımlarda uçucu külün aktivasyonuna katkı sağlamak, deney karışımlarının mekanik özelliklerinde en verimli performansa ulaşabilmek amacıyla aktivatör olarak çimento kullanılmıştır. Literatürdeki benzer çalışmalar gözetilerek ve uçucu külün etkinliğinin belirgin bir şekilde gözlemlenmesi amaçlandığından karışımlarda çimento oranı arttırılmadan, sabit %3 oranında kullanılmıştır. Ayrıca yapılan deneylerde uçucu kül katkısı olmadan yalnızca çimento katkısının da kum zeminin geoteknik özelliklerini nasıl etkilediği incelenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Zemin İyileştirme

Zayıf zemin olarak görülen ve iyileştirilmesi gereken zeminler, turbalık ve bataklık zeminler, yumuşak killer, gevşek kumlar ve yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak kalın alüvyonlardır. Turbalık ve bataklık zeminler, içerisindeki bitkisel çürüdüğünde büyük deformasyonlar yapabilirler. Ek olarak bu zeminlerin taşıma güçleri de yok gibi olduğu için karşılaşmak istenmeyen zeminlerdir. Taşıma gücü çok zayıf ve büyüklüğü az olan yüklere maruz kalsa dahi çok fazla deformasyon yapabilecek olan yumuşak killer de temel zemini olarak kullanabilmek için kesinlikle iyileştirilmelidir. Yeraltı su düzeyi yüksek olan yumuşak kalın alüvyon zeminler ve gevşek kumlar, büyüklüğü orta olan yükleri taşıyabilir ve deformasyonları da bu yükler altında sınırlı olabilir. Böyle zeminlerde deprem, titreşimli ağır makinelerin çalışması, trafik yükü, geçici patlamalar, dalgalar gibi tekrarlı yükler altında dayanım kaybından dolayı taşıma gücünün azalması ve aşırı deformasyon olabilir. Yeraltı su seviyesinin altındaki gevşek kumlarda, tekrarlı yükler altında sıvılaşma davranışı görülür. Sıvılaşmada dayanım sıfırlanır, şekil değiştirmeler çok fazla artar ve göçmeler olur (Özdemir ve Özdemir, 2006). Zemin iyileştirmenin amacı zemin parçacıklarını birbirine bağlayarak su geçirmez duruma getirmek ya da her ikisinin birleşimiyle zeminin mukavemetini geliştirmek ve su ile yumuşamaya karşı direncini artırmaktır (Makusa, 2012). Zemin iyileştirme, taşıma gücü ve kayma dayanımının geliştirilmesi, drenaj sistemi ve filtre gibi farklı uygulamalarda kullanılmaktadır (Prabakar ve ark., 2004).

Zemin iyileştirmenin başlıca hedefleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Tumluer, 2006):

- Taşıma gücü zayıf olan bir zeminin taşıma gücünü artırmak,
- Deformasyonu ve toplam oturmayı azaltmak,
- Konsolidasyonun hızlanmasını sağlamak,
- Zeminlerdeki permeabiliteyi azaltmak,
- Yarma ve dolgu stabilitesini geliştirmek
- Zeminin iksa duvarı gibi görev yapması
- İksayı tutmak ve yapıların yukarı hareketine engel olmak

- Zeminlerin sıvılaşılabirliğini azaltmak,
- Zeminin yoğunluğunun artırılması,
- Kayma dayanımını geliştirmek,
- Yeraltı suyunun drenajını kolaylaştırıp boşluk suyu basıncını azaltmak,
- Don kabarması ile şişme ve kabarmanın etkilerini düşürmek.

2.2. Zemin İyileştirme Yöntemleri

Zemin iyileştirme metodunun seçimi aşağıdakiler dahil olmak üzere birçok koşula bağılıdır (Hausmann, 1990) :

- Gereken iyileştirmenin türü ve derecesi
- İyileştirilecek olan zeminin tipi, jeolojisi, sızıntı durumu
- Maliyet
- Malzeme ve ekipman varlığı ve işin önemi
- İnşaat süresi
- Yakınındaki yapılarla zarar verme ihtimali ve yeraltı suyunun kirlenmesi
- Kimyasal katkı malzemesinin toksisitesi ve aşındırma potansiyeli
- Çevresel koşullar altında ilgili malzemelerin dayanıklılığı
- Tasarım ve analizin güvenilir olması

Literatürde zemin iyileştirme yöntemleri için uygulama derinliğine, katkılı katkısız olma vb. durumlara göre farklı birçok sınıflandırmalar yapılmıştır. Burada zemin iyileştirme yöntemleri; mekanik iyileştirme ve kimyasal iyileştirme olarak iki başlık altında incelenmiştir.

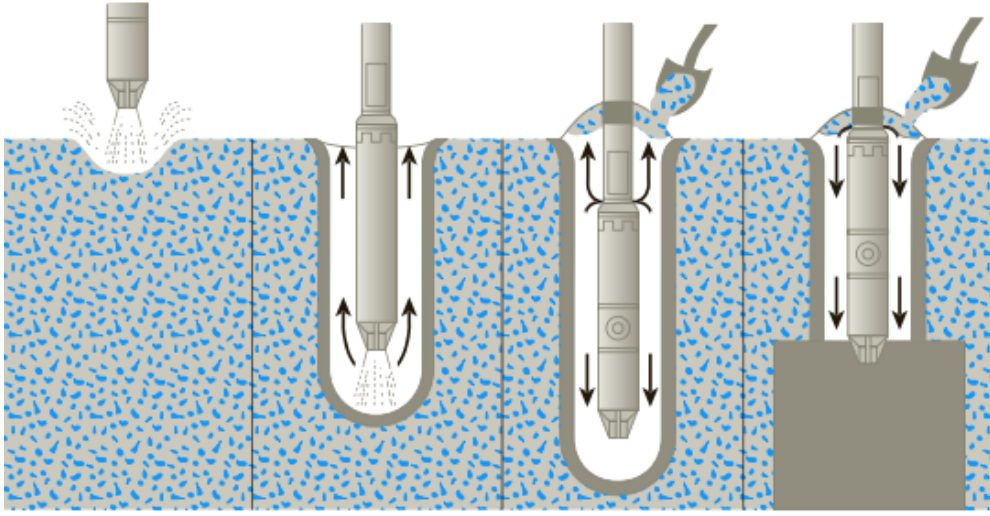
2.2.1. Mekanik İyileştirme

Kompaksiyon: Mekanik işlemlerle zemindeki boşlukların azaltılıp danelerin birbirine yakınlışarak daha sıkı bir yapı haline getirilmesine kompaksiyon denilmektedir. Sıkıştırılan zeminlerin birim hacim ağırlığı artar bu sayede mühendislik parametreleri iyileşir. Uygulanan statik ve dinamik yüklerle daneler hareket eder yakınlışır ve sıkılaşabilirler. Zemin danelerinin karşılıklı hareket kabiliyetleri kompaksiyon enerjisi

ve zemindeki su içeriğine göre farklı olabilmektedir. İdeal sıkışma su içeriğinin zeminde yeteri kadar olması ile elde edilmektedir. Bu değer optimum su içeriğidir (Şengezer, 2010). Killi- kumlu zeminlerin sıkıştırılmasında pürüzsüz yüzeyli silindirler ve kauçuk lastikli silindirler, kohezyonlu zeminler için ise keçi ayaklı silindirler etkilidir. Kohezyonsuz-granüler zeminleri sıkıştırmada titreşimli silindirler efektif olarak kullanılırlar. Otoyol, baraj, atık sahası gibi dolgu inşaatlarında kompaksiyon uygulanırken; zemini sadece yüzeysel iyileştireceğinden dolayı temel zemini uygulamalarında kompaksiyon genel olarak kullanılmaz (Kant, 2003).

Patlatma: Bu metot patlayıcı yüklerin belirlenen derinliklere yerleştirilip zeminde şok dalgalarının meydana gelmesine dayanır. Patlatmanın iş makinesine ihtiyaç duymaması, işçiliğin az olması ve uygulama hızı bu yöntemin önemli avantajlarından birkaçıdır. Patlayıcı yüklerin belirlenen derinliğe konulması yeterli olmaktadır. Patlatmanın bariz bir dezavantajı yer değiştirme ve titreşimlerin civar yapılara zarar verme ihtimalidir ve bu nedenle patlayıcı kullanımı tehlike gibi görülmektedir. Bu sebepten dolayı bu yöntem çevre yapıların bitişiğinde bulunmayan sahaların gelişimiyle sınırlı olmaktadır (Nicholson, 2014).

Vibro Kompaksiyon (Flotasyon): Vibroflotasyon gevşek granüler zeminlerin derin katmanlarının yerinde yoğunlaştırılması için 1930'larda Almanya'da geliştirilen bir tekniktir. Yaklaşık 2,1 m uzunluğunda bir vibroflot ünitesinin kullanımını içeren bir işlemdir. İşlemin detayları Şekil 2.1'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi Vibroflotun altındaki jet açılır ve vibroflot yere indirilir. Granüler malzeme deliğin üst kısmına dökülür. Altta jettten gelen su üst jete aktarılarak granül malzeme üstten aşağı taşınır. Vibroflot 0,3 m'lik asansörler ile aşamalı bir şekilde yükseltilir ve her aşamada 30 saniye titreşimle tutulur. Bu uygulama ile zemin elde edilmek istenen birim ağırlık değerine sıkıştırılır (Braja, 1999).



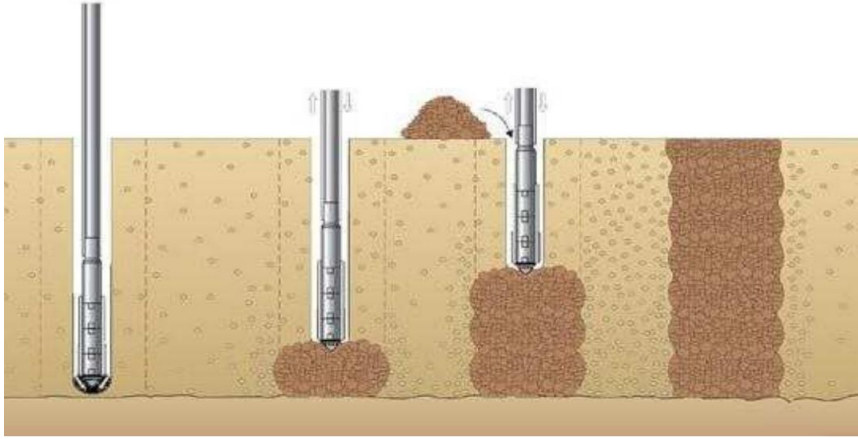
Şekil 2. 1. Vibroflotasyon ile sıkıştırma işlemi (Braja, 1999)

Dinamik kompaksiyon: Dinamik kompaksiyon temel olarak 10-40 tonluk ağırlıkların 10-30m düşme yüksekliğinden sıkıştırma işlemi yapılacak zemine bırakılmasıdır. Bu yöntem ile, yeraltı suyu tabakasının altında ve üstünde biriken granüler zeminleri iyileştirmek, yoğunlaştırmak ve taşıma kapasitesini geliştirmek, oturma ve sıvılaşılabirliği azaltmak amaçlanmaktadır. Dinamik kompaksiyon yöntemi nemi düşük su altı dolgu malzemeleri, kaya dolgu, gevşek kum, gevşek çakıl alüvyon, kohezyonsuz dolgu, siltli ve siltli kum zeminler için uygundur (Miao ve ark., 2006).

Kompaksiyon kazıkları: Kompaksiyon kazığı, gevşek taneli zeminlerde zemine çakılan ucu kapalı olan kaplama borusunun içinin doldurulması esnasında uç kısmın yerinde bırakılması ve kaplama borusunun geri çekilmesi mantığına dayanır. Kaplama borusu zeminde ilerlerken, hacmi kadar zemini yanlara iter ve bu sayede çevre zemini sıkıştırır. Bununla birlikte çakmadan dolayı oluşan titreşimlerle taneli zemin sıkıştırılır (Uzuner, 2000). Kompaksiyon kazıkları kumun sıvılaşılabirliğinin azaltılmasında ve siltlerin, çökeltilerin vb. taşıma gücünün artırılmasında kullanılır (Ayan, 2009).

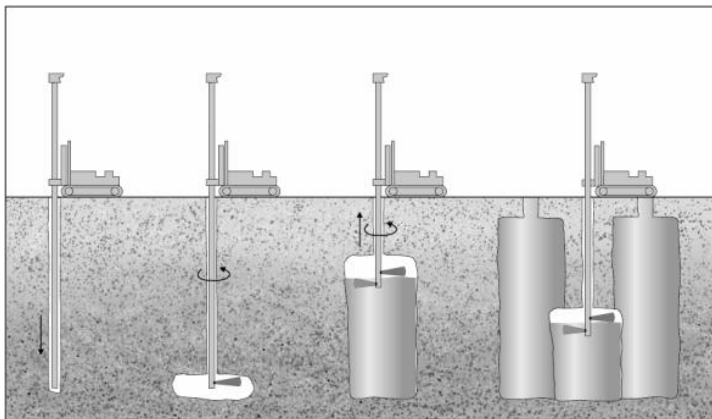
Taş kolonlar: Taş kolonlar çoğunlukla orta katı ve yumuşak killerde, problemlili olan zemin katman kalınlığı 10,0 m'den az ise seçilmektedir. Arazi ve zemin durumu ve üstyapı proje yüklerine göre taş kolonlar ile zeminin taşıma gücünü artırılır, oturma süresi

azaltılır ve depremde sıvılaştan ya da dayanımını yitiren zeminler güçlendirilir. Taş kolon yöntemiyle oturma sorunları %50-%60 oranında azalabilirken, taşıma gücünde daha fazla artış olabilmektedir. Taş kolon uygulamasında Şekil 2.2’de görüldüğü gibi ilk olarak vibroflasyonla kolonlar oluşturulur. Klasik foraj ile sorunlu zemin dışarı çıkarılarak yerine çakıl konular ve sıkıştırılır. Boru çakma veya itme ile zeminin sıkıştırılıp kolonların oluşturulması ile taş kolon imalatı yapılır (Nalçakan, 2004).



Şekil 2.2. Taş kolon uygulama aşamaları (Özaydın, 2012)

Jet grout: Jet grout zemine basınçla su ve çimento karışımı harçların uygulanmasıdır. Jet grout uygulama detayları Şekil 2.3’te verilmiştir. Jet grout tek akışkanlı, çift akışkanlı ve üç akışkanlı olmak üzere 3 farklı sistem şeklinde uygulanmaktadır.



Şekil 2.3. Jet Grout işlemi (Burke, 2004)

Tek Akışkanlı Sistem (Jet 1) en kolay jet grout yöntemidir. Bir ya da birden çok, farklı çaplardaki (2 - 2,4 mm) püskürtme ağızlığı monitörün (püskürte gövdesi) çevresinde konumlandırılmıştır. Hazırlanmış olan harç 400 atm gibi yüksek basınçta ağızdan püskürtülür bu sayede zemin sıyrılır ve harç boşluklara gönderilmektedir. Jet grout kolonu monitörün yukarı çekilmesi, belirli hızlarda kendi çevresinde döndürülmesi, zeminin sıyrılması ve harçla doldurulmasıyla üretilmektedir. İki Akışkanlı (Jet 2) sistemde zemin hava jetinden çimento harcının basılmasıyla kesilmektedir. Püskürtme gövdesi(monitör), içteki harç püskürtme ve dıştaki hava püskürtme görevi gören iç içe geçmiş iki üniteden oluşmaktadır. Üç Akışkanlı (Jet 3) sistemde hava, su ve harç aynı zamanda püskürtülerek kaba daneli zeminler için karıştırma ve ince daneli zeminler için kesilmenin birlikte yapıldığı üç akışkanlı sistemdir. Monitör birbirine bağlı üç borudan oluşmaktadır. Püskürtme ağızlığı (nozzle) monitörde farklı iki yerde bulunmaktadır. Püskürtme gövdesinin üst tarafındaki nozzle su ile havayı püskürtüp zemini parçalar, alt taraftaki nozzle ise harcı düşük basınçlar ile püskürtmektedir (Erdil, 2008).

Derin karıştırma: Derin karıştırma, çoğunlukla kireçli ya da çimentolu bağlayıcı malzemelerle zayıf zeminlerin kolonlar meydana getirerek yerinde iyileştirilmesidir. Derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilen zeminlerin özellikleri, kür süresine, uygulanan katkının miktarı ile katkı malzemelerine göre farklılık göstermektedir. Bu yöntemde nem miktarı fazla yumuşak killi ve gevşek kumlu zeminler en uygun zeminlerdir (Kaptan ve ark., 2021). Delici alet kolon noktasına yerleştirilir. Karıştırıcı şaft zemini sıyrarak belirlenen derinliğe indirilir. Şaft belirlenmiş olan derinliğe indikten sonra zemini harmanlayarak yukarı çekilir. Şaftın derinliğe inmesi ve/veya yukarı çekilmesi aşamalarında kireç ya da çimento harcı verilip zemine karıştırılır (Onur ve ark., 2016).

2.2.2. Kimyasal İyileştirme

Zeminlerin kimyasal olarak stabilizasyonu kireç, uçucu kül, portland çimentosu ya da sodyum klorür benzeri aktif kimyasal bileşikler veya viskoelastik olan bitüm benzeri malzemelerin zeminlere eklenmesi ya da enjeksiyonlanmasıdır. Sönmüş kireç, Portland çimentosu ve uçucu kül geleneksel olan stabilizatörler; sülfonatlı yağlar, amonyum klorür, enzimler, polimerler ile potasyum bileşiklerinin oluşturduğu geleneksel olmayan

stabilizatörler; çimento fırın tozu, kireç fırın tozu gibi yan ürün stabilizatörler olarak kimyasal stabilizatörler üç kategoride sınıflandırılmıştır. Kireç ve çimento üretim sonucu elde edilen malzemeler iken uçucu kül elektrik elde etmek için kömürün yanmasıyla yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır (Little ve Nair, 2009). Kimyasal stabilizasyonun başta gelen uygulamaları alt temel, temel, erozyon kontrolü amacıyla şev kaplamaları ve temel altı taşıyıcı desteklerdir (Santos ve ark., 2013).

Zeminde kullanmak için katkı malzemesinin tercihinde değerlendirilmesi gereken parametreler şunlardır (Aytekin, 2004) :

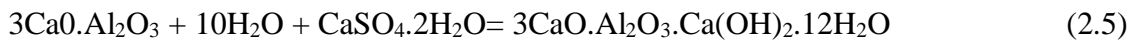
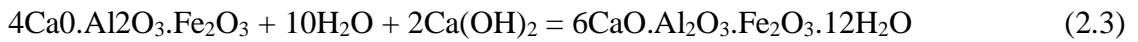
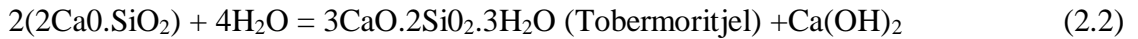
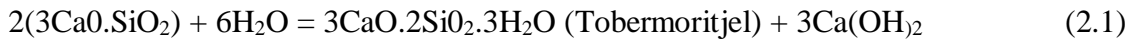
- İyileştirme ile özellikleri amaca uygun olacak olan zeminin türü
- İyileştirmenin hedefi
- Zeminin iyileştirilecek özelliklerinin ne olduğu
- İyileştirilmiş olan zeminden istenen mukavemet
- Çevreye etkisi ve ekonomi

Çimento ile Zemin İyileştirme: Çimento, kil ve kireçtaşının (CaCO_3) yüksek sıcaklıklarda döner fırınlarda pişirilmesiyle elde edilen bağlayıcılık özelliği olan bir malzemedir. Çimento su ile karıştırıldığında bileşen bileşikleri kimyasal reaksiyona uğrar. Çimentonun su ile reaksiyonu hidrasyon olarak adlandırılmaktadır. Ortaya çıkan ürüne ise klinker adı verilmektedir. Portland çimentosu, alçı taşının klinkere % 4-5 oranında katılıp çok ince öğütülmesiyle oluşmaktadır.

Çimento 1960'lı yıllarda zemin iyileştirme teknolojisinin bulunmasından beri bilinen ilk bağlayıcıdır. Çimento ve zemin reaksiyonları zemin mineralleriyle ilişkili değildir asıl önemli olan çimentonun zeminde bulunan su ile reaksiyonudur. Bu sebepten dolayı çimento farklı türden zeminlerin iyileştirilmesinde kullanım sebebi olabilir(Kumar, 2018). Zeminlere eklenen çimento içeriği kumlarda % 2-6, killerde % 8-12 arasındadır (Demiröz ve Karaduman, 2009). Çimento ile zemin iyileştirilmesinde dayanım, rijitlik ve dayanıklılığın artışı, nem duyarlılığının daha az olması ve don kontrolü önemli kazanımlardır (Hausmann 1990). Zemin ve çimentonun karıştırılma tekniğine, çimento miktarına, sıkıştırma derecesi ile yöntemine ve kürlenmeye göre çimento katkılı zeminlerin, plastisite, sıkışılabilirlik, mukavemet, hacim değişimi, deformasyon,

permeabilite ve don mukavemeti belirlenebilmektedir. Çimento katkı zeminlerin mukavemetini çimentonun türü ve kimyasal kompozisyonu önemli oranda etkiler ve artan çimento miktarıyla mukavemet artar (Kalıpcılar ve ark., 2015).

Portland çimentosu ana bileşenleri trikalsiyum silika (C₃S), dikalsiyum silika (C₂S), trikalsiyumalümin (C₃A), ve tetrakalsiyumalüminoferrit (C₄A) olan heterojen yapıda bir malzemedir. Çimento zemindeki boşluk suyu ile birleşince hidrasyon başlar ve birincil hidrasyon ürünleri hidrate kalsiyum silikatlar (C₂SH_x, C₃S₂H_x), hidrate kalsiyum alüminatlar (C₃AH_x, C₄AH_x) ve hidrate kireç (Ca(OH)₂) meydana gelir. Hidrasyon sonucunda sıralanan ilk iki ürün çimentolaşan temel ürünler iken, sönmüş kireç katı kristal faz şeklinde oluşturulur. Bu çimento partikülleri katılma anında komşu çimento partiküllerini birbirine bağlayıp zemin danelerini kaplayan katılmış iskelet matrisi oluştururlar. Bunlara ilaveten çimentonun hidrasyonu sönmüş kirecin ayrışmasından kaynaklanan boşluk suyunun pH değerinin artmasına sebebiyet verir. Puzolanik reaksiyon adı verilen ikinci aşamada sulu silis ve alümin serbest kalsiyum iyonları ile reaksiyona girerek, zemini iyileştirmek amacıyla kürlendiğinde ikincil çimentolu ürünler olan çözünmeyen bileşikler oluşur. Su eklenince Portland çimentosunda bulunan bileşenler aşağıdaki dönüşüme uğrar:



Bu denklemlerde;

3CaO.SiO₂:trikalsiyum silika(C₃S)

2CaO.SiO₂:dikalsiyum silika(C₂S)

4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃:tetrakalsiyumalüminoferrit(C₄AF)

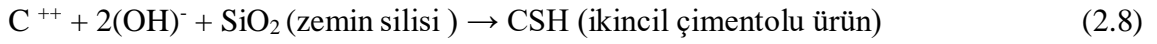
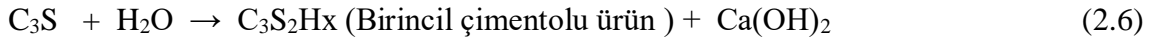
3CaO.Al₂O₃: trikalsiyumalümin(C₃A)

Ca(OH)₂ : kalsiyum hidroksit

CaSO₄.2H₂O: kalsiyum sülfat dihidrat

H₂O: su olarak tanımlanmaktadır.

Bu reaksiyonların ardından, çimento ve zemin karıştığında meydana gelen reaksiyonlar aşağıda bulunan denklemlerde gösterilmiştir. Aşağıda yalnızca Portland çimentosunun en önemli bileşeni olan C_3S 'in reaksiyonları verilmiştir.



Birincil reaksiyon sonucu oluşan ürünlerin dayanımı fazladır. İkincil reaksiyon olan puzolanik reaksiyonlar ise parçacıkların bağ kuvvetininin gelişimini sağlamak amacıyla ek çimentolu malzeme üretilip zeminin dayanım ve dayanıklılığını artırır (Bergado ve ark., 1996).

Haeri ve arkadaşları (2005) çalışmasında kumlu çakıllı malzemeye çimentolanmanın etkisini araştırmıştır. Bu amaç doğrultusunda çimento katkısı olmayan ve yapay bir şekilde çimentolanmış karışımlara konsolide drenajsız üç eksenli deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapay olarak çimentolanmış karışımlara serbest basınç deneyleri de yapılmıştır. Çimento katkısı kuru zemine ağırlıkça %1,5, %3, %4,5, %6 ve %9 oranında katılmıştır. Deney numuneleri 18 kN/m^3 bağıl yoğunluk ile %70 rölatif sıklıkta ve $17,5 \text{ kN/m}^3$ ile %50 rölatif sıklıkta olmak üzere iki farklı koşulda, optimum su içeriğinde hazırlanmıştır. Çimento katkılı numuneler üç eksenli testlerden önce 28 gün kürlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda çimento katkılı karışımların serbest basınç dayanımı artan çimento içeri ve yoğunlukla artmıştır. Çevre basıncının düşük değerlerinde çimentolu ve çimentosuz numunelerin aşırı boşluk suyu basıncı deneylerin başlangıcında pozitifken, kayma gerilmesinin artışıyla negatif olmuştur.

Al-Aghbari ve arkadaşları (2009) çalışmasında çöl kumlarının stabilizasyonu için çimento ve çimento fırın tozunu kullanılmıştır. Çimento ve çimento fırın tozu zeminin kuru ağırlığına göre %2, %4, %8, %10 ve %12 oranında ilave edilmiştir. Hazırlanan karışımlara serbest basınç ve kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda çimento ve çimento fırın tozu katkılı çöl kumlarının mühendislik

parametrelerinin gelişim gösterdiği görülmüştür. Maksimum kuru yoğunluk, serbest basınç mukavemeti ve kayma dayanımında gözle görülür artışlar olmuştur. Karıştırmanın uygun bir biçimde yapılması ve 28 gün gibi bir kür süresinde kürlenmesi durumunda karışımın serbest basınç dayanımı sert killerden daha çok olmuştur. Böyle bir karışımın taşıma gücünün az veya orta katlı bir yapıya destek için yeterli olacağı bildirilmiştir. Portland çimentosunun dayanıma katkısı çimento fırın tozundan daha fazla olmasına rağmen, daha ekonomik olması açısından çimento fırın tozu tercih edilmiştir. %8 veya daha fazla çimento katkılı kumun temel veya alt temel tabakalarında kullanılabileceği bildirilmiştir.

Amini ve Hamidi (2014) çalışmasında, %70 kum ve %30 çakıl içeren çimentolu, zayıf dereceli kum çakıl karışımına konsolide drenajlı ve drenajsız durumda üç eksenli basınç testleri gerçekleştirmiştir. Portland çimentosu çimentolama malzemesi olarak kuru ağırlıkça %0, %1, %2 ve %3 oranında kum çakıl karışımına eklenmiştir. Karışımlar %70 bağıl yoğunlukta hazırlanarak 50 kPa, 100 kPa ve 150 kPa'lık basınçlarda test edilmiştir. Drenajlı durumda drenajsız duruma göre çimentolu zeminlerin gevrek davranışı daha belirginken, pik kayma dayanımındaki eksenel şekil değiştirme ve yenilme zarfları drenajsız koşulda daha fazla olmuştur.

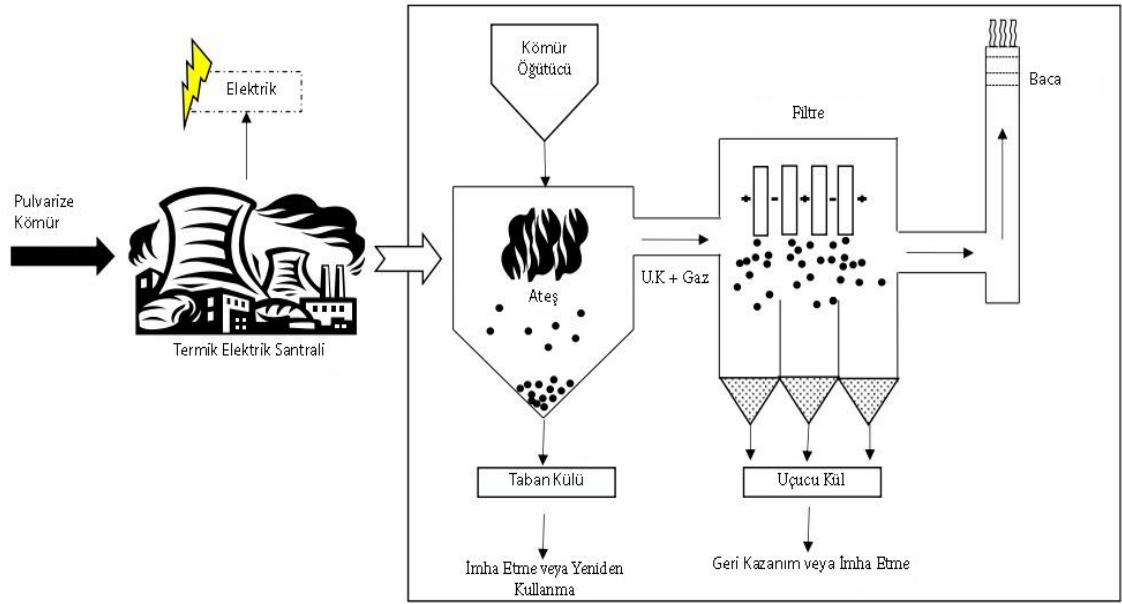
Suzuki ve arkadaşları (2014) çalışmasında üç eksenli ve serbest basınç testlerinin sonuçlarını göz önünde bulundurarak kür sırasında uygulanan izotropik ve bir boyutlu konsolidasyon gerilmesinin çimento katkılı zeminlerin pik ve rezidüel kayma dayanımına etkilerini değerlendirmiştir. Çalışma kapsamında ince kum ve Portland çimentosu kullanılmıştır. Farklı konsolidasyon koşullarında kürlenmiş çimento katkılı zeminin drenajsız pik kayma dayanımının konsolidasyon basıncı ve kür süresindeki artışla arttığı görülmüştür. Konsolidasyon sebebiyle drenajsız mukavemetteki artış hızı, tek boyutlu ve izotropik konsolidasyonlar arasında büyük değişiklik göstermiştir. 1-7 gün kür süresi için izotropik konsolidasyonla dayanım artış oranı tek boyutlu konsolidasyonla gerçekleşen dayanım artış oranından daha çok olmuştur.

Forcelini ve arkadaşları (2016) çalışmasında kum zemine %3 ve %7 oranında çimento katkısı ile 0,60, 0,66 ve 0,72 olarak üç farklı boşluk oranında hazırlanan numuneler

üzerinde eksenel ve çapsal basınç deneyleri yapmıştır. Deneyler için basit bir basınç presi kullanılmışlardır. Otomatik olan pres 1,14 mm/dk' ya eşit sabit bir basınç hızına sahiptir. Hazırlanan karışımlar 7, 14, 28 ve 56 gün kür sürelerinde test edilmiştir. Test sonuçları hem eksenel basınç testi hem de çapsal basınç testi için çimento içeriği ve kür süresindeki artışın direnci artırdığını, boşluk oranındaki artışın ise direnci azalttığını göstermiştir.

Salunkhe ve arkadaşları (2022) çalışmasında nehir kumuna ağırlıkça %1, %2 ve %3 çimento eklenerek serbest basınç dayanımı ve direkt kesme deneyleri yapılmıştır. Direkt kesme deneylerinde zemin numunelerini hazırlamak için ahşap kalıp kullanılmıştır. Serbest basınç deneyleri için numuneler 7 ve 21 gün küre tabii tutulurken, direkt kesme deneyleri için 7 gün kür edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda kullanılan Portland çimentosunun az da olsa artırılmasıyla zeminin kayma dayanımı ve serbest basınç dayanımının gözle görülür bir şekilde artırdığı, kür süresinin etkisinin önemli olduğu anlaşılmıştır.

Uçucu Kül ile Zemin İyileştirme: Uçucu küller termik santrallerde enerji üretmek amacıyla yakılan öğütülmüş kömürden ortaya çıkan yan ürünlerden biridir. Buhar türbinlerinden elektrik enerjisi üretiminde gerekli olan buharı elde etmek amacıyla kömür yakılarak su ısıtılır. Bu sayede kömürün ısı enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülmüş olmaktadır. Bu amaç için antrasit veya linyit gibi çeşitli kömürler kullanılmaktadır. Yanma işlemi süresince kömürdeki karbon ve diğer yanıcı maddeler hariç, kil, şeyl, kuvarz, feldspat vs. safsızlıkları bulunduran kül baca gazları içinde askıda kalır. Uçucu kül olarak tanımlanan büyük bir kısmı baca gazlarıyla taşınarak mekanik ve elektrostatik filtrelerde tutulurken, daha az bir kısmı da taban külünü oluşturur (Tokyay, 2013). Fırın tabanında toplanan atık malzemelerden %75-80'i uçucu küldür (Alkaya, 2009). Uçucu küller 1200-1700°C'de besleme kömürünün organik ve inorganik bileşenlerinden üretilirler. Uçucu küllerin bileşenlerinin çeşitliliği ve ince boyutları nedeniyle antropojenik ürünler arasından karakterize edilmesi en komplike araştırma konularındandır. Kömürde yaklaşık 316 mineral, uçucu külden ise yaklaşık 188 mineral grubu tanımlanmıştır (Vassilev ve Vassileva, 2005). Kömürle çalışan enerji santrallerinde uçucu kül ve taban külünün oluşum aşamaları Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Uçucu kül ve taban külünün oluşum aşamaları (Tangüler ve ark, 2014)

Literatürdeki en az 10 yıllık verilere göre pek çok tahminde, uçucu kül üretiminin küresel olarak yıllık 500 milyon ton olduğu bildirilmiştir. Arada geçen zamanda Çin'deki ekonomik gelişmeye bağlı olarak kömür tüketimi %50 artmıştır. Bu verilere dayanarak dünya genelinde uçucu kül üretiminin yıllık yaklaşık 750 milyon ton olduğu (Blissett ve Rowson, 2012), ancak %25 kadarının geri dönüştürüldüğü tahmin edilmektedir (Wang, 2008). Uçucu külün geri dönüştürülmesine inşaat sektörü yön vermektedir. Uçucu kül inşaat sektöründe beton, katkılı çimento, gaz beton ve tuğla üretiminde, zemin iyileştirmede ve dolgularda kullanılmaktadır. Elektrik enerjisinin elde edilmesinde kömür yakan termik santrallerin büyük öneme sahip olduğu Türkiye'de, hemen hemen her bölgede kömür kullanan termik santraller bulunmaktadır. Bu santrallerde genellikle linyit, az da olsa taş kömürü yakılmaktadır. Termik santrallerde linyitin yakılmasıyla %17- 46 oranında uçucu kül elde edilmektedir (Tangüler ve ark., 2015). Türkiye İstatistik Kurumu 2012 verilerine göre Türkiye'de 2012 yılında termik santrallerde meydana gelen 19,3 milyon ton atığın %98,6'sı mineral atıklardan (kül, cüruf, uçucu kül ve alçıtaşı) oluşmuştur. Bu atıkların %3,3'ü satılmış, %67,4'ü kül dağı/barajına atılmış, %6,5'i lisanslı şirketlere verilmiş, %19,1'i diğer yöntemlerle(madene verme, belediye çöplüğüne bırakma, düzenli depolama ve yakma) yok edilmiş, %3,7'si ise tesis içerisinde geri kazanılmıştır (TÜİK, 2012).

Kendi başına bağlayıcılığı çok az ya da hiç bulunmayan, su varlığında normal sıcaklıkta kireçle kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliğe sahip ürünler oluşturan, toz halindeki silisli ve alüminli ya da yalnızca silisli maddeler puzolan olarak adlandırılmaktadır. Doğal ve yapay olarak puzolanlar iki sınıfa ayrılmaktadırlar (Alkaya, 2009). Uçucu küller termik santrallerde oluşan yapay ve en yaygın puzolanlardır (Özcan ve Güngör, 2019). Uçucu kül gri renkte, tanecik yapısı çok küçük olan bir malzemedir. Yanmanın tam olup olmamasına göre uçucu külün rengi gri veya daha koyu olabilir. Yanma tam değilse bünyesindeki yanmamış karbondan dolayı uçucu külün rengi daha koyudur. Yanma iyi olmuşsa uçucu külün rengi daha açıktır. Uçucu külün ne kadar ince olacağına, kazandaki kömürün öğütülme derecesi ve uçucu küllerin olabildiğince bacadan kaçmasının engellenmesi etki eder. Bacada kalanın artması inceliği artırmaktadır. Camsı ve büyük oranda küresel tanecikli olan uçucu küllerin boyutları 0,5-200 mikron, özgül yüzeyleri ortalama 2800 - 3800 cm²/gr'dır (Güler ve ark., 2005). SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve CaO uçucu külün temel bileşenleridir ve miktarları uçucu külün sınıfına göre farklılık göstermektedir. Uçucu küldeki minör bileşenler ise MgO, SO₃ ve alkali oksitlerdir (Turker ve ark., 2009).

ASTM C618'e göre uçucu küller F ve C sınıfı uçucu kül olarak ikiye ayrılmaktadır. F sınıfı uçucu küller termik santralde taş kömürünün yanması ile ortaya çıkmaktadır. F sınıfı uçucu küllerde SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ yüzdesi % 70'den fazla CaO oranı ise %10'dan azdır ve bu uçucu küller düşük kireçli uçucu kül olarak da bilinirler. Termik santrallerde linyit kömürü yakıldığında ortaya çıkan uçucu kül ise C sınıfı uçucu olarak tanımlanmaktadır. Bu uçucu küllerin içeriğinde SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ yüzdesi % 50'den fazla CaO oranı ise %10'dan fazladır ve yüksek kireçli uçucu kül olarak da bilinmektedirler. C sınıfı uçucu küller içeriğindeki CaO sayesinde kendi kendine çimentolanma özelliği gösterirken F sınıfı uçucu küllerde CaO bulunmadığından ancak yanında bir aktivatör ile (kireç, çimento vb) reaksiyona girerek sertleşme özelliği gösterirler (ASTM C618, 2015).

Kaniraj ve Havanagi (1999) çalışmalarında Hindistan ve Almanya'dan elde edilen iki farklı uçucu külü silt ve kum zemine farklı oranlarda eklemiştirler. Her iki uçucu külde de kireç oranı düşüktür ve F sınıfı uçucu kül olarak tanımlanmıştır. Uçucu kül-zemin

karışımının stabilizasyonu için %3-%9 değişen oranlarda çimento ilave edilmiştir. Standart proktor testleri ile belirlenen optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde hazırlanan silindirik numuneler farklı sürelerde kürlendikten sonra serbest basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Serbest basınç mukavemeti ve sekant modülü için kür süresinin, uçucu kül ve çimento içeriğinin fonksiyonları olarak korelasyonlar oluşturulmuştur. Bu sonuçlara göre uçucu kül-zemin karışımının sekant modülü ve serbest basınç dayanımındaki kazancın zamanla hiperbolik olduğunun kabul edilebileceği bildirilmiştir. Sekant modülü ve serbest basınç mukavemetindeki kazancın uçucu kül ve çimento içeriğine bağlı olduğu, bu kazancın artan çimento içeriği ile arttığı fakat uçucu kül içeriğindeki artışla azaldığı bulunmuştur. Çimentonun etkisinin uçucu külden daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Sahu (2001) çalışmasında 6 farklı zemine uçucu kül katkısının CBR değerine etkisini incelemiştir. Uçucu kül zeminlere ağırlıkça % 4, 8, 16 ve % 24 oranlarında eklenmiştir. Zemin-uçucu kül karışımlarının modifiye proktor deneyi ile optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunluk değerleri bulunmuştur. CBR deneyleri için Modifiye proktor enerjisiyle sıkıştırılan, optimum su içeriğinde hazırlanan numuneler çuvallara sarılarak 7 gün küre tabii tutulmuştur, çuvallara belirli zaman aralıklarında su serpilip ıslak kalması sağlanmıştır. 7 gün çuvallara sarılı olarak bekleyen numuneler sonrasında 4 gün 5,5 kg'lık sürşarj yükü altında suya konulmuştur. 4 gün sonra numuneler sudan çıkarılıp süzölmüştür ve CBR deneyi uygulanmıştır. Yapılan modifiye proktor deneyleri sonuçlarından optimum su muhtevasına uçucu külün önemli bir etkisinin olmadığı, maksimum kuru birim hacim ağırlığın artan uçucu kül oranıyla azaldığı görülmüştür. Uçucu külün özgül ağırlığının düşük olmasından dolayı bunun beklenen bir sonuç olduğu belirtilmiştir. ML zemin için ise bu durum daha farklı bir eğilim göstererek %16 uçucu kül katkısına kadar maksimum kuru birim hacim ağırlığın biraz artıp sonra azaldığı gözlemlenmiştir. CBR değerinin artan uçucu kül içeriği ile arttığı, CBR değerindeki en fazla artışın siltli kum zeminde, en az artışın ise yüksek plastisiteli(CH) zeminde olduğu ve zemin tiplerine göre stabilizasyon için gerekli olan uçucu külün farklı miktarlarda olacağı belirtilmiştir.

Öksüz (2006) çalışmasında uçucu kül katkılı zeminlerin mukavemetini değerlendirmek için serbest basınç deneyleri yapmıştır. Kuru kuma ağırlıkça %5 çimento, %5, %10, %15 ve %20 oranında uçucu kül eklenmiştir. Serbest basınç deneyleri için numuneler 7, 14, 28 ve 56 gün kürlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda kum zemine uçucu kül katkısının serbest basınç mukavemetini artırdığı ve artan uçucu kül içeriği ile dayanımın arttığı görülmüştür.

Sumesh ve arkadaşları (2010) çimento ve F sınıfı uçucu kül katkılı kumlu ve killi siltli bir zeminin mukavemetini araştırmıştır. Kumlu ve killi siltli zeminlerin kütlece %90'ına kadar artan oranlarda uçucu kül eklenmiştir. Zemin-uçucu kül karışımlarına kütlece %1 ve %2 oranında çimento katılmıştır. Tüm numuneler optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkta hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler serbest basınç deneyi için 0, 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süresinde desikatörde %100 bağıl nemde bırakılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda her iki zemin tipi için de uçucu külün ve kür süresinin serbest basınç dayanımına olumlu olarak etki ettiği görülmüştür.

Saha ve Pal (2013) çalışmalarında ard arda yerleştirilen siltli kum zemin ve uçucu kül katmanlarının serbest basınç dayanımını araştırmışlardır. Uçucu kül ve zemine özgül ağırlık, dane boyutu analizi, Atterberg limitleri, standart Proctor ve serbest basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Zemin ve uçucu kül katmanları, uçucu kül-zemin-uçucu kül olarak ve zemin-uçucu kül-zemin olarak iki farklı koşulda oluşturulmuştur. Karışımlar maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasında hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler oda sıcaklığında 0, 7, 14, 28, 56 gün kürlenmiştir. Deneylerin sonucunda zemin ve uçucu külün farklı katmanlarda bulunmasının serbest basınç dayanımını tek başına zemine göre artırdığı gözlenmiştir. Kür süresinin ve uçucu kül katman sayısının artmasıyla zeminlerin serbest basınç dayanımının arttığı görülmüştür.

Ige ve Ajamu (2015) çalışmalarında kum zeminin uçucu kül ile iyileştirilmesi için uygun miktarda uçucu kül içeriğini belirlemeyi amaçlamışlardır. Kum zemine %0, %10, %20, %30, %40 oranlarında uçucu kül eklenerek optimum su muhtevasında hazırlanan numunelere serbest basınç deneyi yapılmıştır. Serbest basınç mukavemetinin %40 uçucu

kül katkısı ile $102,51\text{kN/m}^2$ değeri ile maksimum olduğu bulunmuştur ve saha uygulamalarında kum zeminin iyileştirilmesi için %40 uçucu kül içeriği önerilmiştir.

Motamedi ve Hashim (2015) çalışmalarında kum zemine uçucu kül ve çimento ilave ederek uçucu külün ve optimum su içeriğinin serbest basınç mukavemetine etkisini araştırmışlardır. Uçucu kül numunenin toplam ağırlığının %5-40'ı olarak çimento içeriği ise %5-25'i olarak kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda çimento miktarının serbest basınç dayanımına gözle görülür bir etkisinin olduğu ve kür süresi arttıkça serbest basınç dayanımının arttığı görülmüştür. %30 uçucu kül ve %15 çimento içeriğinde serbest basınç dayanımı ilk gün 4,23 MPa olurken, 7, 14 ve 28. günlerdeki serbest basınç dayanımı 6,94, 8,06 ve 9,14 MPa olmuştur. Serbest basınç dayanımının en yüksek değeri 28 günlük kürden sonra 13,22 MPa olarak uçucu kül miktarı %30 ve çimento miktarı %25 iken, en düşük değeri de 1 günlük kürden sonra 1,2 MPa olarak %30 uçucu kül ve %5 çimento miktarında olduğu gözlemlenmiştir.

Mahvash ve arkadaşları (2017) uçucu kül katkısının ince kum zeminlerin kompaksiyon davranışına etkisini ve dolgu olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu amaç doğrultusunda %5, %10 ve %15 oranlarında F sınıfı uçucu kül ve sabit %3 oranında Portland çimentosu ince kum zemine eklenmiştir. Uçucu külün etkisini daha belirgin bir şekilde görebilmek için kum zemine sadece %3 oranında çimento katılarak da numune hazırlanmıştır. Yapılan kompaksiyon deney sonuçlarına göre kum zemine çimento katkısı ile optimum su muhtevasının azaldığı, çimento katkısının %3 olmasına rağmen kuru birim hacim ağırlığa önemli bir etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. Optimum su muhtevasındaki bu azalışın çimentonun aktivasyonda ürettiği fazla ısıdan kaynaklandığı düşünülmüştür. Artan uçucu kül oranıyla optimum su içeriğinin arttığı ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin azaldığı belirtilmiştir.

Mahvash ve arkadaşları (2018) ince kum zeminlerin stabilizasyonunda uçucu külün kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında %5, %10 ve %15 oranlarında uçucu kül stabilizatör olarak, %3 sabit oranında çimento ise aktivatör olarak kullanılmıştır. CBR deneyleri 7, 14 ve 28 gün kürlenmeden sonra katkısız sade kum numunesi ve katkılı numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan CBR deneyleri

sonuçlarından uçucu kül oranı ve kürlenme süresinin taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkisinin olduğu anlaşılmıştır. Katkılı karışımların CBR değerlerinin katkısız sade kum numunesine göre %76-1453 oranında arttığı belirtilmiştir. Deneysel sonuçlarına göre F sınıfı uçucu külün aktivatör olarak uygun bir oranda çimento ile birlikte kum zemin stabilizasyonunda kullanımının uygun olabileceği sonucuna varılmıştır.

Keramatikerman ve arkadaşları (2017) çalışmasında uçucu kül katkıli kumların sıvılaşma direncini değerlendirmek amacıyla bağıl yoğunluk(Dr), uçucu kül içeriği, çevre basıncı ve kür süresini dikkate alarak döngüsel üç eksenli deneyler yapmıştır. Deneysel çalışmanın ilk bölümünde çevre basıncı 50 kPa, uçucu kül %2 ve devirsel gerilme oranı (CSR) değeri 0,2 alınarak, %40, %60 ve %80 bağıl yoğunlukta karışımlar üzerinde testler yapılmıştır ve katkısız kum ile kıyaslanmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm bağıl yoğunluklarda katkısız kum numunesinin katkıli karışımlara göre sıvılaşma direncinin daha düşük olduğu, bağıl yoğunluğun %80 olması durumunda uçucu kül katkıli karışımın sıvılaşma direncinin en fazla olduğu bildirilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde %4 ve %6 oranında uçucu kül kullanılarak %20 bağıl yoğunluğa sahip numuneler 50, 70 ve 90 kPa olmak üzere 3 farklı çevre basıncı ile test edilmiştir. Bu bölümün sonuçları değerlendirildiğinde sıvılaşma direncinin kullanılan tüm çevre basıncı değerlerinde %4 uçucu kül katkısına kıyasla %6 uçucu kül katkısında daha fazla olduğu bulunmuştur. Çalışmanın son bölümünde çevre basıncının ve kür süresinin etkisi incelenmiştir. Çevre basıncı 50, 70 ve 90 kPa ve %20 bağıl yoğunlukta kum %2 uçucu kül katkısı ile CSR değerinin sıvılaşmaya kadar olan çevrim sayısı ile değişimi değerlendirilmiştir. Uçucu külün %2 olması durumunda numuneler 14 ve 28 gün küre tabii tutularak 50 kPa çevre basıncı ve %20 bağıl yoğunlukta test edilmiştir. Artan kür süresinin uçucu kül katkıli kumun sıvılaşma direncine olumlu olarak etki ettiğini göstermiştir.

Kaçmaz (2019) çalışmasında birleştirilmiş zemin sınıflandırmasına göre SW olarak tanımlanan zemine farklı oranlarda Soma uçucu külü ve mermer tozu katmıştır. Karışımların optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluk değerleri standart proktor deneyi ile bulunmuştur. Tek eksenli basınç deneyi için optimum su içeriğinde hazırlanan numuneler 3 kat streçe sarılı olarak 7 ve 28 gün kür süresinde bekletilmiştir. Tek eksenli

deney sonuçlarından dayanımın kür süresi ile arttığı görülmüştür. 1 günlük kürden sonra en fazla dayanım 2,88 kN/m² olarak %10 mermer tozu-%10 uçucu kül katkısında, 7 günlük kürden sonra en fazla dayanım 6,73 kN/m² olarak %10 mermer tozu-%20 uçucu kül katkısında, 28 günlük kürden sonra en fazla dayanım 26,16 kN/m² olarak %15 mermer tozu-%30 uçucu kül katkısında bulunmuştur. Oluşan bu farklılığın deney koşullarından olabileceği düşünülmüştür. Araziye serilmesi için laboratuvarında elde edilen sonuçlara göre farklı kür sürelerinde en fazla dayanımı veren uçucu kül ve mermer tozu oranı değiştiği için ve literatürdeki çalışmalar göz önünde bulundurularak %15 mermer tozu ve %15 uçucu kül oranı seçilmiştir. Uçucu külün yavaş gerçekleşen puzolanik reaksiyonundan dolayı dayanımın zamanla kazanıldığı görülmüştür.

Kolay ve arkadaşları (2019) çalışmasında Ottawa kumunun sıvılaşma davranışına F sınıfı uçucu külün etkisini değerlendirmişlerdir. Bu amaç doğrultusunda kuma ağırlıkça %10, %20, %25, %30, %50 ve %70 oranında uçucu kül eklenerek gerilme kontrollü döngüsel üç eksenli deneyler yapılmıştır. Kum-uçucu kül karışımlarının sıvılaşma direncine çevre basıncının etkisini değerlendirmek için 34,48, 68,96 ve 103,42kPa olarak üç farklı çevre basıncında testler gerçekleştirilmiştir. Uçucu kül numunesine ise sadece 34,48 kPa'lık bir çevre basıncı uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre uçucu kül katkısının sıvılaşma direncinde önce azalmaya daha sonra %20-25'e kadar artışa neden olduğu görülmüştür.

Simatupang ve arkadaşları (2020) çalışmasında uçucu kül katkısının ince ve kaba kum zeminlerin serbest basınç ve kayma dayanımına etkilerini araştırmıştır. Doğal ve temiz kum zemine kuru kumun toplam ağırlığının %5, %10, %15, %20, %25 ve %30'u kadar uçucu kül eklemiştir. Numunelerin doygunluk derecesi %30, %50 ve %100 olarak belirlenmiştir. Serbest basınç dayanımı ve direkt kesme testleri için hazırlanan numuneler 7, 14, 28 ve 56 gün kürlendikten sonra test edilmiştir. Bağlı yoğunluk tüm numunelerde %50 olarak belirlenmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre kum zeminin serbest basınç ve kayma dayanımının uçucu kül içeriğindeki artış ve kür süresi ile arttığı bildirilmiştir. Dane boyutu ve doygunluk derecesindeki artışın ise dayanımı azalttığı belirlenmiştir. İnce dane içeriği, uçucu kül katkılı kumun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde olumsuz bir etki oluşturmuştur. İnce dane içeriğinin uçucu kül ve kum arasındaki kimyasal reaksiyonu bozabileceği belirtilmiştir. Sonuç olarak, temiz kumların (ince danesiz)

mekanik özellikleri, doğal kumlardan (ince daneli) daha yüksek olmuştur. Deneyle sonunda kum zeminlere uçucu kül katkısı ile en iyi sonucun elde edilebilmesi için bir aydan fazla zamana ihtiyaç olduğu belirtilmiştir.

Azaiez ve arkadaşları (2021a) çalışmasında uçucu kül katkısının iri daneli zeminlerin kompaksiyon ve kayma davranışına etkilerini değerlendirmiştir. Çalışma kapsamında yapılan deneylerde $D_{max}=4,0$ mm, 2,0mm ve 0,63 mm olarak 3 farklı dane boyutunda Chlef kumu ve %0, %5, %10, %15 oranında uçucu kül kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda maksimum dane çapı ve uçucu kül içeriğindeki artışın kum-uçucu kül karışımlarının maksimum kuru yoğunluk değerinde önemli bir artışa, optimum su içeriği değerinde ise azalmaya neden olduğu bildirilmiştir. Uçucu kül miktarının %0'dan %15'e ve maksimum dane çapının 0,63 mm'den 4,00 mm'ye artışıyla kayma mukavemeti değerlerinin de arttığı görülmüştür.

Azaiez ve arkadaşları (2021b) çalışmasında maksimum dane çapı 4,0 mm ve 2,0 mm olan iki farklı kum zemine %5, %10 ve %15 oranlarında uçucu kül ekleyerek %90 rölatif sıklıkta hazırlanan kum-uçucu kül karışımlarına 100kPa, 200kPa ve 300kPa normal gerilme değerleri altında kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda uçucu kül içeriğinin deney karışımlarının sürtünme açısına önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. Uçucu kül miktarının %0'dan %15'e ve normal gerilme değerlerinin 100 kPa'dan 300 kPa'ya artışıyla hem ince kumda hem kaba kumda pik ve rezidüel kayma dayanımlarının arttığını bildirmişlerdir.

Kireç ile Zemin İyileştirme: Kireç pek çok endüstri işlemi ve uygulama için önemli olan çok yönlü bir kimyasaldır. Kireç, kalsine edilmemiş kalsiyum karbonat ($CaCO_3$), sönmemiş kireç (CaO) ve hidrate kireç olarak $Ca(OH)_2$ farklı şekillerde kullanılmaktadır (İLA, 1999). Kalsiyum karbonat içeren kireçtaşlarının 900-1000°C de kalsinasyonu ile kireç (CaO) oluşur. Oluşan bu kireç sönmemiş kireçtir. Kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) olan sönmüş kireç, sönmemiş kirecin su ile reaksiyonu sonucu elde edilir. Kalsiyumu yüksek olan kireçtaşının tersinir denklemi aşağıdaki gibidir (Çiçek 1999):



Mühendislik özelliklerini geliştirmek amacıyla zeminlere kirecin katıldığı zemin iyileştirme yöntemi kireç stabilizasyonudur. İnce taneli zeminlerin özelliklerini geliştirmek için kireç ile iyileştirme kabul gören bir uygulamadır. İlk saha uygulamaları karayolları ve hava meydanları kaplama imalatında 1950-1960 yıllarında bildirilmiştir. İyileştirme için kullanılan kireç %5-10 arasındadır. Kireç ile iyileştirme için puzolanların su bulunduğu kireç ile reaksiyona girerek çimentolu bileşikler oluşturduğu puzolanik reaksiyon da denebilir. En çok kullanılan kireç sönmemiş kireçtir (Babu ve Poulouse, 2018).

İnce daneli zeminlere kireç katkısı zeminin plastisitesinin azalmasını, buna ek olarak kil mineralleri ve kireç arasında meydana gelen puzolanik reaksiyon neticesinde oluşan çimentolanmadan dolayı zeminde dayanım artışını sağlamaktadır. Kireç ile iyileştirme çoğunlukla killi zeminlerden oluşan dolgularda (özellikle yol yapılarında) uygulanmaktadır (Özaydın, 2016).

Kireç ile işlenmiş zeminin tepkisi karışıktır ve bu tepkileri açıklamak için bir takım açıklamalar önerilmiştir :

- Katyon değişimi : Magnezyum, sodyum ya da önceden zemin kilinin tuttuğu diğer katyonların, kireçten türetilmiş kalsiyum katyonlarıyla değiştirilmesi
- Flokülasyon : Kilin topaklaşması ve bu sayede efektif dane boyutunun artması
- Karbonatlaşma : Kireç atmosferdeki karbondioksit ile reaksiyona girerek, çimentolama etkisi uyguladığı bilinen kalsiyum karbonat oluşumu
- Puzolanik reaksiyonlar : Çimentolu yapıda yeni minerallerin oluşumu için zemin bileşenleriyle reaksiyonlar olarak tanımlanır (Diamond ve Kinter, 1965).

Kireç ve su uygun miktarda katılıp zeminin pH'ı hızlı bir şekilde 10,5'in üzerine çıktığı zaman silis ve alümin salınarak kireçteki kalsiyumla reaksiyona girip kalsiyum silika hidratlar (CSH) ve kalsiyum alümina hidratlar üretilir.



Denklemlerde,

CaO: kalsiyum oksit

Ca(OH)₂: kalsiyum hidroksit

SiO₂: silisyum oksit

Al₂O₃: alüminyum oksit

H₂O: su' dur.

Oluşan CSH ve CAH, Portland çimentosunda üretilenlere benzeyen çimentolu malzemelerdir. Kireçle işlenmiş zemin tabakalarının dayanımını oluşturan matrisi oluştururlar. Bu matrisin oluşmasıyla zemin taneli ve kumlu malzemeden taşıma gücü fazla olan sert, görece daha geçirimsiz bir katman haline gelir. Saatler içinde başlayan süreç yıllar boyu sürebilir. Meydana gelen bu matris, geçici değildir, dayanıklı ve geçirimsizliği iyidir. Güçlü ve esnek bir yapısal tabaka oluşturur (Babu ve Poulouse, 2018).

Bitüm ile Zemin İyileştirme: Çimento ve kireç stabilizasyonu zeminin dayanımını puzolanik reaksiyonlar sonunda artırırken, bitümlü iyileştirmenin zeminin suyun zararından muhafaza etmesi ve daneleri birleştiren bir etkisi bulunmaktadır. Bitüm danelerin yüzeyini sararak ince daneli zeminlerin su ile yumuşamasını engellerken, iri daneli zeminlerin de kohezyona sahip olmasını sağlar. Bunun yanı sıra danelerin birbirine bağlanmasına neden olduğu için su ve rüzgar erozyonu direncini de artırmaktadır. Asfalt, katran benzeri malzemeler bitümlü iyileştirmede kullanılır. Daneli zeminlerden olan kırma taş, çakıl, kum gibi zeminlere sıcak sıvı bitümlü malzeme eklenir harmanlanıp serilerek sıkıştırma yapılır. Bitümlü malzemelerin danelerin birbirine bağlanmasıyla geçirimsizlik oluşturma fonksiyonu vardır. Petrol veya asfalttan üretilen bitüm, siyah yapışkan sıcak olduğunda sıvı olan malzemedir. Bitümlü malzemeler yaklaşık %5-10 oranında eklenir. Bitüm ile iyileştirme çoğunlukla yollarda ve yüzey kaplamalarında uygulanır (Şengül, 2010).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Atık malzemelerin zemin iyileştirme uygulamalarında kullanımını hem ekonomik olması hem çevre sorunlarını azaltması yönüyle önemli bir alternatif olarak değerlendirilebilmesi ve literatürde kum zeminlerin uçucu kül ile iyileştirilmesi konusunda daha çok çalışma yapılması gerektiği ile ilgili öneriler dikkate alınarak bu tez çalışmasında uçucu külün ince kum zeminlerin geoteknik özelliklerine etkisinin incelenmesi amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında uçucu kül ve çimentonun ince kum zeminin geoteknik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Deneylerde kullanılan malzemelerin özellikleri, hazırlanan karışım numunelerinin notasyonları ve yapılan deneyler bu bölümde ele alınmıştır.

3.1. Kullanılan Malzemeler

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde zemin malzemesi olarak kum kullanılmıştır. Piyasadan temin edilen ticari kum Bursa Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik laboratuvarına getirilerek etüvde kurutulup elendikten sonra deneylerde kullanıma hazır hale getirilmiştir. Yapılan deneylerde kum zemine stabilizatör olarak değişen oranlarda uçucu kül ile uçucu külün aktivasyonuna katkı sağlamak, deney karışımlarının mekanik özelliklerinde en verimli performansa ulaşabilmek amacıyla aktivatör olarak sabit %3 oranında çimento katılarak numuneler hazırlanmıştır. Literatürdeki benzer çalışmalar gözetilerek ve uçucu külün etkinliğinin belirgin bir şekilde gözlemlenmesi amaçlandığından karışımlarda çimento oranı arttırılmamış, sabit %3 oranında kullanılmıştır.

Deneyler için hazırlanan numuneler, çimento ve uçucu kül içerikleri ve numunelerin notasyon bilgileri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneysel program çerçevesinde hazırlanan numuneler

Numune	Notasyon	Çimento içeriği (%)	Uçucu kül içeriği (%)
Kum	K	-	-
Kum+%3çimento	K3Ç	3	-
Kum+%3çimento+%5 uçucu kül uçucu kül	K3Ç5UK	3	5
Kum+%3çimento+%10 uçucu kül uçucu kül	K3Ç10UK	3	10
Kum+%3çimento+%15 uçucu kül	K3Ç15UK	3	15
Kum+%3çimento+%20	K3Ç20UK	3	20
Kum+%3çimento+%25 uçucu kül	K3Ç25UK	3	25

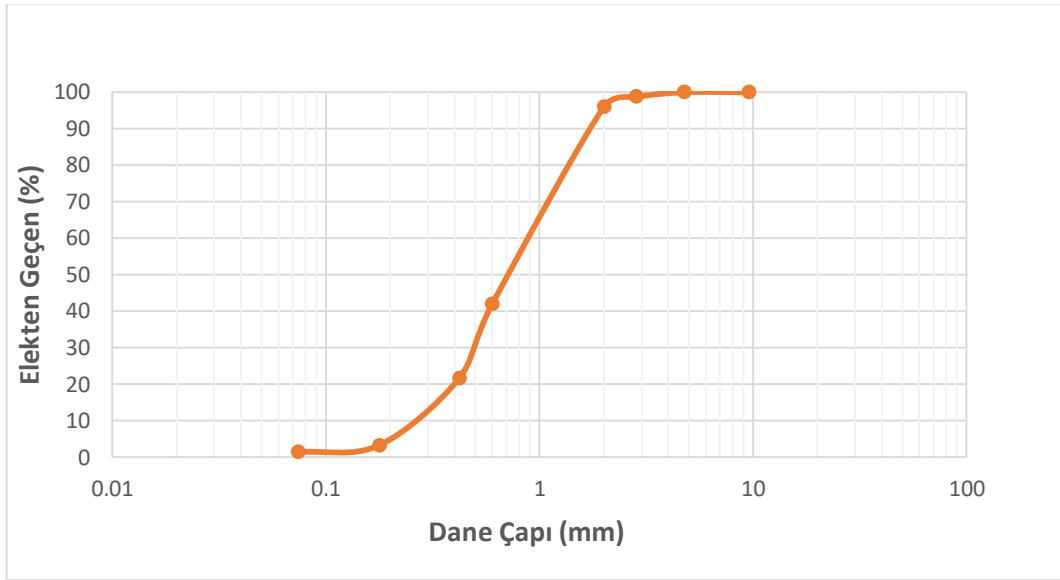
3.1.1. Zemin Özellikleri

Bu tez çalışmasında zemin malzemesi olarak piyasadan temin edilen inşaat kumu kullanılmıştır. Etüvde kurutulduktan sonra elek analizi yapılarak ASTM D2487'e göre zemin sınıflandırması yapılan kum, Birleşmiş Zemin Sınıflandırmasına göre kötü derecelendirilmiş temiz kum (SP) olarak tanımlanmıştır. Zeminin dane boyutu dağılım eğrisi Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Kum zeminin indeks parametreleri deneylerle belirlenmiştir ve Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Kumun minimum boşluk oranı ASTM D4253'e göre maximum boşluk oranı da ASTM D4254'e göre belirlenmiştir. Maximum boşluk oranını bulmak için çapı 152 mm olan kalıba, kalıbı dolduracak kadar kum numune huni ile serbest bırakılarak dökülmüştür ve kütlesi ölçülmüştür. Elde edilen kütle kalıp hacmine bölünerek minimum birim hacim kütle (ρ_{\min}) bulunmuştur. Bulunan ρ_{\min} değeri ilgili formüllerde yerine konularak e_{\max} elde edilmiştir. Minimum boşluk oranını bulmak için ise aynı kalıba numune yerleştirildikten

sonra üzerine sürşarj yükü konulmuştur ve titreşimli tablada 8 dakika titreşime maruz bırakıldıktan sonra tartılarak maksimum birim hacim kütle (ρ_{max}) bulunarak e_{min} değeri elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde kum önce 30 No'lu (0,6 mm çaplı) sonra 200 No'lu (0,074 mm çaplı) eleklerden elendikten sonra ince kum elde edilerek maksimum dane boyutu $D_{max}=0,6$ mm olan ince kum numunesi kullanılmıştır. Şekil 3.2'de deneylerde kullanılan kum numunesi gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kum zeminin dane boyutu dağılım eğrisi



Şekil 3.2. Kum numune

Çizelge 3.2. Kum zeminin indeks parametreleri

USCS Zemin Sınıflandırma	SP
Özgül Ağırlık (G_s)	2,78
e_{max}	1,190
e_{min}	0,626
$\gamma_{d,max}$ (kN/m^3)	16,76
$\gamma_{d,min}$ (kN/m^3)	12,44
Üniformluk katsayısı(C_u)	2,50
Derecelenme katsayısı(C_c)	1,20
Efektif Dane Çapı, D_{10} (mm)	0,52

3.1.2. Çimento

Deney karışımlarında sabit %3 oranında aktivatör olarak bulunan çimento için CEM II / A-M (P-L) 42,5R Portland Kompoze çimento tercih edilmiştir. Portland kompoze çimentolar, klinkere belli miktarlarda katkı malzemesi (uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) ve alçıtaşının katılmasıyla öğütülerek elde edilen çimentolardır. Şekil 3.3A'da kullanılan çimento gösterilmiştir.

3.1.3. Uçucu Kül

Deneyleerde kullanılan uçucu külün içeriğinde $\text{CaO} = 29,28 > 10$ ve $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 50,92 > 50$ olduğundan dolayı ASTM C618 standardına göre C sınıfı uçucu kül olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.3B'de kullanılan uçucu kül gösterilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan deneyleerde kullanılan uçucu kül ve çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Uçucu kül ve çimentonun dane boyutu dağılım eğrisi Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

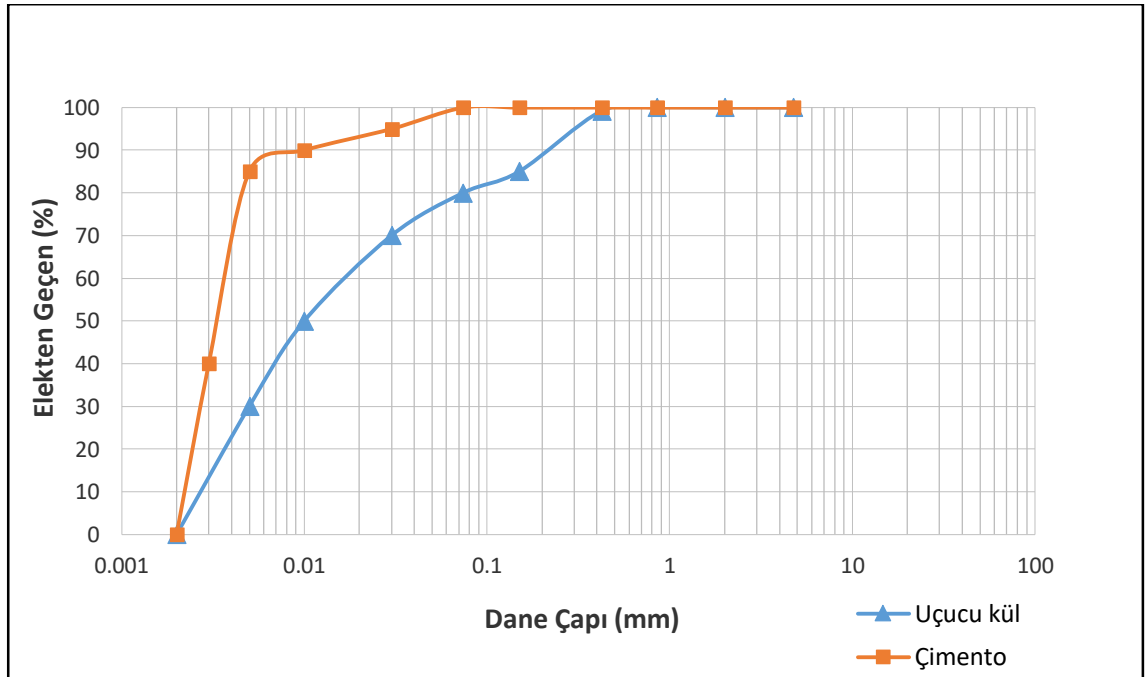


Şekil 3.3. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu kül ve çimento

A) Portland kompoze çimento **B)** C sınıfı uçucu kül

Çizelge 3.3. Çimento ve uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	Kimyasal Özellikler	
	Çimento	Uçucu Kül
Özgül ağırlık	3,04	2,46
Özgül yüzey (cm ² /g)	4260	2380
	Kimyasal Bileşenler	Çimento (%) Uçucu Kül (%)
	SiO ₂	25,08 29,88
	Al ₂ O ₃	6,24 15,03
	Fe ₂ O ₃	2,90 6,01
	CaO	56,44 29,28
	MgO	0,88 2,27
	SO ₃	2,34 13,34
	Na ₂ O	0,73 0,13
	K ₂ O	0,96 1,71



Şekil 3.4. Uçucu kül ve çimentonun dane boyutu dağılım eğrisi

3.2 Yöntem

Bu bölümde yapılan deneyler ve yöntem ele alınmıştır. Uçucu kül ile stabilize etmek için etüvde kurutulmuş olan temiz kum numuneler, sırayla 30 no'lu (0,6mm çaplı) ve 200 no'lu (0,074mm çaplı) eleklerden elenmiştir ve yapılan deneylerde kumun maksimum dane boyutu (D_{max}) 0,6 mm olarak kullanılmıştır. İnce kum zemine stabilizatör olarak ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında uçucu kül, aktivatör olarak sabit %3 oranında çimento katılarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Belirlenen karışım oranlarında hazırlanan katkılı numunelere ve katkısız sade kum numunesine kompaksiyon deneyleri yapılarak her bir karışımın optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri bulunmuştur.

Bulunan optimum su içeriğinde hazırlanan katkısız sade kum numunesine ve katkılı numunelere kesme kutusu (kürsüz), CBR (7 ve 28 gün kür) ve permeabilite (kürsüz) deneyleri yapılarak uçucu kül ve çimento katkısının ince kum zeminlerin geoteknik özellikleri üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

3.2.1. Özgül Ağırlık Deneyi

İnce daneli zeminlerin özgül ağırlık değerleri piknometre yöntemiyle belirlenebilmektedir. Bu çalışmada ASTM C128'e göre özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Her numune için bu deney 3 kez yapılarak ortalama alınmıştır ve bu değer özgül ağırlık olarak kaydedilmiştir. Numunelerin özgül ağırlık değeri aşağıdaki eşitlik (3.1) ile hesaplanarak bulunmuştur. Şekil 3.5'te piknometre+su+numune ağırlığı gösterilmiştir.

$$G_s = \frac{(M_2 - M_1)}{(M_4 - M_1) - (M_3 - M_2)} \quad (3.1)$$

Burada,

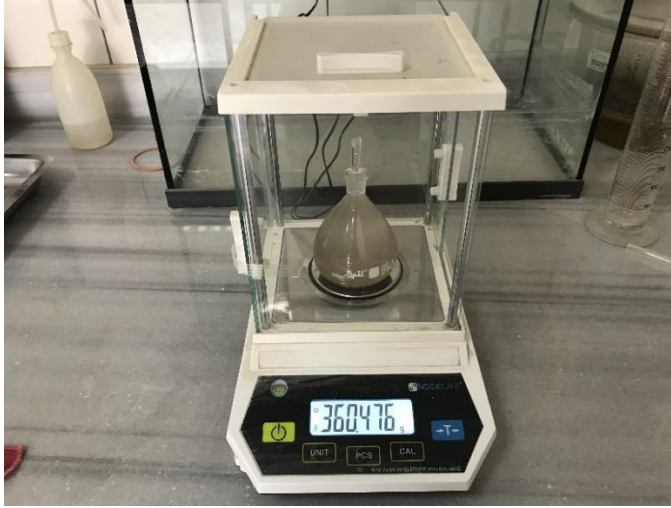
G_s : Özgül Ağırlık

M_1 : Piknometrenin boş ağırlığı (g)

M_2 : Piknometre+Numune ağırlığı (g)

M_3 : Piknometre+Numune+Su ağırlığı (g)

M_4 : Piknometre+Su ağırlığı (g)



Şekil 3.5. Piknometre+Su+Numune ağırlığının belirlenmesi

3.2.2. Standart Proktor Deneyi

Deney karışımlarının optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerini bulmak için ASTM D698'e göre Standart Proktor deneyleri yapılmıştır. Standart Proktor deneyleri kum zeminin maksimum dane çapı ($D_{max}=0,6mm$) göz önünde bulundurularak malzemenin %20'den daha azı 4,75 mm'lik elek üzerinde kaldığı için Metot A' ya göre yapılmıştır. Bu yöntemde kullanılan kalıp çapı 101,6 mm'dir. Hazırlanan karışımlar her tabakaya 25 vuruş olacak şekilde 30 cm yükseklikten, 600 kNm/m³ sıkıştırma enerjisi uygulanarak 3 katman halinde tokmakla sıkıştırılmıştır. Standart Proktor deneylerinde kullanılan kalıp ve tokmak Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Karışımların optimum su içeriğini tayin edebilmek için her aşamada kontrollü bir şekilde artırılan su miktarıyla yeni numune hazırlanmıştır ve 5 farklı su içeriği için kompaksiyon eğrisi çizilmiştir. Kalıpta sıkıştırılmış olan kalan numune bir sonraki aşama için tekrar kullanılmamıştır. Her adımda artırılan su içeriği için kum-uçucu kül-çimento karışımları yeniden hazırlanmıştır. Kum gibi taneli malzemeler sıkıştırılırken kırılan parçacıklar karışımdaki ince içeriğini artırabileceği için deney karışımları her su içeriğinde yeniden oluşturularak kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Bu sayede taneli malzemelerde parçacık kırılmasından kaynaklanan ince içeriği artışının su içeriğinin tayininde yanıltıcı sonuçlar vermesinin önüne geçilmiştir.



Şekil 3.6. Deneyde kullanılan kalıp ve tokmak

3.2.3. Kesme Kutusu Deneyi

Zeminin dayanabileceği nihai ya da maksimum kayma gerilmesi zeminin kayma mukavemetidir. Zeminlerin kayma mukavemeti geoteknik mühendisliğinde büyük öneme sahiptir. Dayanma duvarının arkasındaki, bir şevdeki, temel ya da kaplamayı destekleyen zeminin kayma mukavemeti şev stabilitesini, dayanma duvarı tasarımını ve dolaylı bir şekilde üstyapı tasarımını, derin ya da sığ temellerin taşıma gücünü etkiler (Holtz ve ark., 1981).

Bu çalışmada numunelerin kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için ASTM D3080 standardına göre kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Kesme kutusu deneyi çoğunlukla kum zeminlerin kayma dayanımını belirlemek için uygulanmaktadır. Kum zeminlerin bulunan kayma dayanımı açısı drenajlı yükleme içindir ve saha koşullarına uygun olduğu söylenebilir (Özaydın, 2016).

Kum zemine ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında uçucu kül ve sabit %3 oranında çimento katılarak hazırlanan numunelere yapılan kesme kutusu deneyleri deneysel program çerçevesinde iki set olarak gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.4'te kesme kutusu deneylerinde incelenen parametreler gösterilmiştir. Kesme kutusu deneylerinin ilk setinde deney numuneleri gevşek durumu temsil etmesi için %30 rölatif sıklıkta

hazırlanarak deneyler yapılmıştır. İkinci sette ise numuneler sıkı durumu temsil etmesi amacıyla %80 rölatif sıklıkta hazırlanmıştır. Bu sayede uçucu kül ve çimento katkısının kum zeminlerin değişen rölatif sıklık durumuna göre içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerine nasıl etki ettiğinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 3.4. Kesme kutusu deneylerinde incelenen parametreler

Parametreler	
Uçucu kül miktarı (%)	5, 10, 15, 20, 25
Çimento miktarı (%)	3
Kür süresi(gün)	kürsüz
Rölatif sıklık (%)	30, 80
Dane boyutu	İnce kum (0,074-0,60mm)
Kum tipi	Temiz

Kesme kutusu deneylerinde numuneler %30 ve %80 rölatif sıklıkta hazırlanmıştır. Belirlenen her bir rölatif sıklık değeri için kesme kutusuna yerleştirilecek olan numunenin kütlesi laboratuvar deneylerinden elde edilen maksimum ve minimum boşluk oranlarına göre aşağıdaki eşitliklerde yerine yazılarak bulunmuştur.

$$D_r(\%) = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (3.2)$$

$$\frac{G_s}{1+e} = \frac{M_s}{V} \quad (3.3)$$

Burada,

D_r : Rölatif sıklık

e_{\max} : Maksimum boşluk oranı

e_{\min} : Minimum boşluk oranı

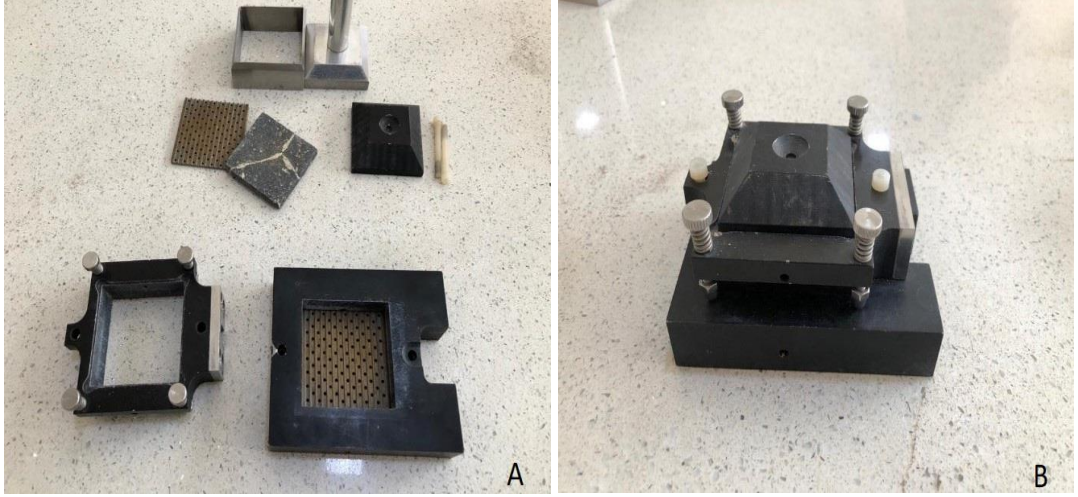
e : Boşluk oranı

G_s : Özgül ağırlık

M : Kesme kutusuna yerleştirilecek numune kütlesi

V : Kesme kutusu hacmi' dir.

Kesme kutusuna yerleştirilecek olan numune miktarları belirlendikten sonra numunelerin yerleştirilme işlemi sıkı durum için optimum su içeriğinde hazırlanan numune Şekil 3.7a'da görüldüğü gibi 60x60x25 mm boyutundaki kare kesme kutusuna 3 tabaka halinde sıkıştırılarak yerleştirilmiştir ve deneye hazır duruma getirilmiştir(Şekil 3.7b). Gevşek durumun sağlanması için ise optimum su içeriğinde hazırlanan numunenin aynı boyuttaki kesme kutusuna sabit bir yükseklikten serbest düşmesi sağlanarak yerleştirilmiştir. Gevşek olarak hazırlanan numuneye herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmamıştır. Deneyleerde kullanılan kesme kutusu deney cihazı Şekil 3.8a'da gösterilmiştir. Hazırlanan kesme kutusu deney cihazına Şekil 3.8b'de görüldüğü gibi yerleştirilerek 54,5 kPa, 109 kPa ve 218 kPa normal gerilme değerleri altında ve sabit 0,5 mm/dk kesme hızında deneyleer geręekleřtirilmiřtir. Uygulanan normal gerilmeler altında üst yaka sabit kalırken alt yaka hareket ederek zemin numunesinin orta kısmından geçen düzlem boyunca göçmeye zorlanmıştır. Numunelerin yenilme anına kadar kesme kuvveti ve yatay deformasyon okumaları kaydedilmiştir. Optimum su muhtevasında ve belirlenen rölatif sıklıkta hazırlanan her bir deney numunesi için 3 farklı normal gerilme değeri altında deneyleer yapılmıştır. Yapılan kesme kutusu deneyleerinin sonucunda numunelerin içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri belirlenmiştir.



Şekil 3.7. Kesme kutusu deney ekipmanları ve kesme kutusu deneyi için hazırlanan numunenin görünümü

A) Deney ekipmanları **B)** Deney için hazırlanan numune



Şekil 3.8. Kesme kutusu deney cihazı ve kesme hücre sine yerleştirilen kesme kutusu

A) Deney cihazı **B)** Kesme hücre sineindeki kesme kutusu

3.2.4. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi

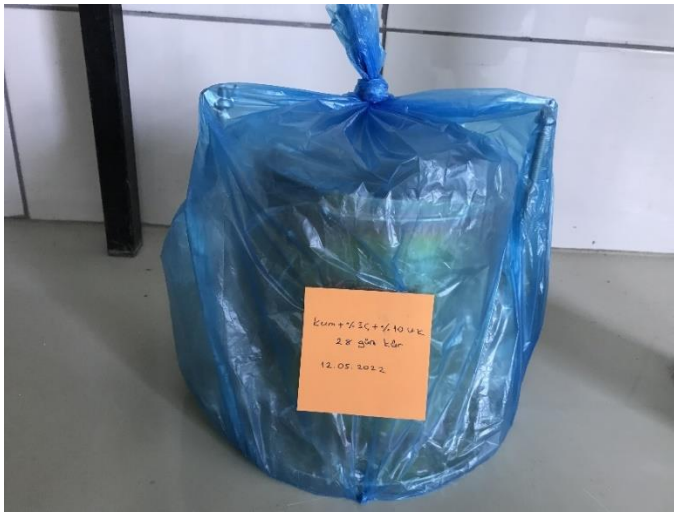
Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), bu çalışma kapsamında ASTM D1883'e göre belirlenmiştir. CBR değeri, kalıbında sıkıştırılarak hazırlanmış numuneye çapı 50 mm kesit alanı 19,32 cm² olan bir pistonun penetrasyonu için gereken kuvvetin standart kırmataş numunesine batması için gerekli olan kuvvete oranından bulunur. Hazırlanan numunelerin CBR değerleri, deney esnasında numunelerin 2,5 ve 5 mm penetrasyonlardaki yük okumaları kaydedilerek standart kırmataşa uygulanan yük değerlerine bölünerek düzeltmeler yapılır ve büyük olan değer CBR değeri olarak kabul edilir. Çalışma kapsamında yapılan CBR deneylerinde incelenen parametreler Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. CBR deneylerinde incelenen parametreler

Parametreler	
CBR	Kuru CBR ve Islak CBR
Uçucu kül miktarı (%)	5, 10, 15, 20, 25
Çimento miktarı (%)	3
Kür süresi(gün)	7, 28
Kür koşulu	Streçe sarılı ve poşet içinde
Dane büyüklüğü	İnce kum (0,074-0,60mm)
Kum tipi	Temiz

Uçucu kül ve çimento katkılı numuneler ile katkısız sade kum numunesi iç çapı 152,4 mm ve yüksekliği 177,8 mm olan CBR kalıbında kalıp tabanına 50 cm kalınlığındaki taban plakası yerleştirilerek sıkıştırılmıştır. Optimum su içeriğinde hazırlanan deney karışımları CBR kalıbında her tabakada eşit numune olacak şekilde 3 tabaka halinde ve her tabakaya 56 vuruş uygulanarak 2,5 kg'lık tokmakla sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılarak hazırlanan CBR numunelerinin üzerine disk şeklinde 2 adet 2,27 kg'lık toplam 4,54 kg olan sürşarj yükleri yerleştirilerek önce streçe sarılmıştır ardından poşete konulup ağzı bağlanarak 7 ve 28 gün küre bırakılmıştır. Şekil 3.9'da K3Ç10UK numunesinin 28 günlük küre hazır durumu gösterilmiştir. Kür süresini tamamladıktan sonra kuru CBR değerlerini elde edebilmek için numuneler deney cihazına konulmuştur.(Şekil 3.10a) 50 mm

çapındaki penetrasyon pistonu numunelerin yüzeyine yerleştirilmiştir ve 1,3mm/dk hızla cihaz içerisindeki numuneye itilmiştir. Deney süresince yük-deformasyon okumaları alınmıştır. 2,5 mm ve 5 mm'lik penetrasyon okumaları kaydedildikten sonra deney sonlandırılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen 2,5 mm ve 5 mm penetrasyondaki yük değerlerinin gerekli düzeltmeleri ASTM D1883'e göre yapılarak standart kırmataş için belirlenmiş olan yük değerlerine oranlanıp elde edilen bu iki değerden yüksek olanı numunenin CBR değeri olarak kabul edilmiştir. Şekil 3.10b'de K3Ç10UK numunesinin 28 gün kür sonunda CBR testi sonrası görünümü verilmiştir.



Şekil 3.9. K3Ç10UK numunesinin 28 günlük küre hazır duruma getirilmesi



Şekil 3.10. CBR deney düzeneği ve K3Ç10UK karışımının 28 gün kür sonunda CBR testi sonrası görünüşü

A) Deney düzeneği **B)** K3Ç10UK karışımının 28 gün kür sonunda test sonrası görünüşü

Deneysel program kapsamında kum-uçucu kül-çimento katkılı numunelere ve katkısız sade kum numunesine ıslak CBR deneyleri de yapılmıştır. Optimum su içeriğinde 3 katman halinde ve her katmana 56 vuruş olacak şekilde 2,5 kg'lık tokmakla sıkıştırılarak hazırlanan deney karışımlarının alt ve üst kısmına filtre kağıdı konulmuştur. Hazırlanan numunelerin üst kısmına 4,5 kg'lık sürşarj yükleri yerleştirilerek önce streçe sarılmıştır ardından poşete konulup ağzı bağlanarak 7 ve 28 gün küre bırakılmıştır. Streçe ve poşete sarılı halde 7 ve 28 gün kür süresini tamamladıktan sonra numuneler suya konulmuştur. Suya bırakılan numunelerin üzerine deformasyon ölçer yerleştirilerek şişme durumu olup olmayacağı gözlemlenmiştir. 4 gün suda bekletilen numuneler sudan çıkarılıp 15 dakika süzöldükten sonra CBR deney cihazına yerleştirilip test edilerek yük-deformasyon okumaları kaydedilmiştir.

3.2.5. Permeabilite Deneyi

Hidrolik iletkenlik katsayısı olarak da bilinen, 'k' ile gösterilen geçirimsizlik katsayısı, nispeten değişken bir zemin parametresidir. Geçirgenlik katsayısı arazide yerinde yapılan testlerle, laboratuvar deneyleri veya dane boyut dağılıma bağlı ampirik bağıntılardan dolaylı bir şekilde bulunabilmektedir.

Geçirgenlik katsayısının büyüklüğünün tayininde iki önemli unsur dane boyutu ve ikincil boşluklardır(secondary interscites). Aşağıda sıralanan parametrelerin geçirgenlik katsayısına etkisi daha az olmasına rağmen geçirgenlik katsayısının elde edilmesini daha kompleks duruma getirir. (Nagy ve ark., 2013):

- Dane yönü ve şekli
- Boşlukların bağlantısı ve miktarı
- Üniformluk katsayısı
- Sızıntıdan önceki su miktarı ve doyma şartları
- Geçen suyun özellikleri
- Hidrolik durumlar (eğim, Reynolds sayısı vs.)
- Kalıcı olmayan durumlar (danelerin göçü, arınması ve yıkanması)

Bu çalışmada geçirimsizlik katsayısını belirleyebilmek için karışımlarda bulunan uçucu kül ve çimento içeriğinden dolayı ince malzeme miktarı ve kullanılan kumun maksimum dane boyutu ($D_{max}=0,60$ mm) göz önünde bulundurularak düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Düşen seviyeli permeabilite deneyleri ASTM D5856'ya göre yürütülmüştür. Karışımlar Standart Proktor deneylerinden bulunan optimum su içeriğinde ve maksimum kuru yoğunluk değerinde proktor enerjisi uygulanarak alt ve üst yüzeyine filtre kağıdı yerleştirilerek permeabilite kalıbında sıkıştırılmıştır. Doymun hale getirilen numuneler Şekil 3.11'da görülen permeabilite deney düzeneğine yerleştirmiştir ve su seviyesindeki düşüşler belli sürelerde okunarak kaydedilmiştir.

Düşen seviyeli permeabilite deneylerinden hesaplanan permeabilite katsayısı (k) eşitlik (3.4)'e göre hesaplanmıştır.

$$k = \frac{2.3aL}{At} \log\left(\frac{H}{H-\Delta H}\right) \quad (3.4)$$

Formülde,

k:permeabilite katsayısı

a:boru kesitinin alanı

L:numune boyu

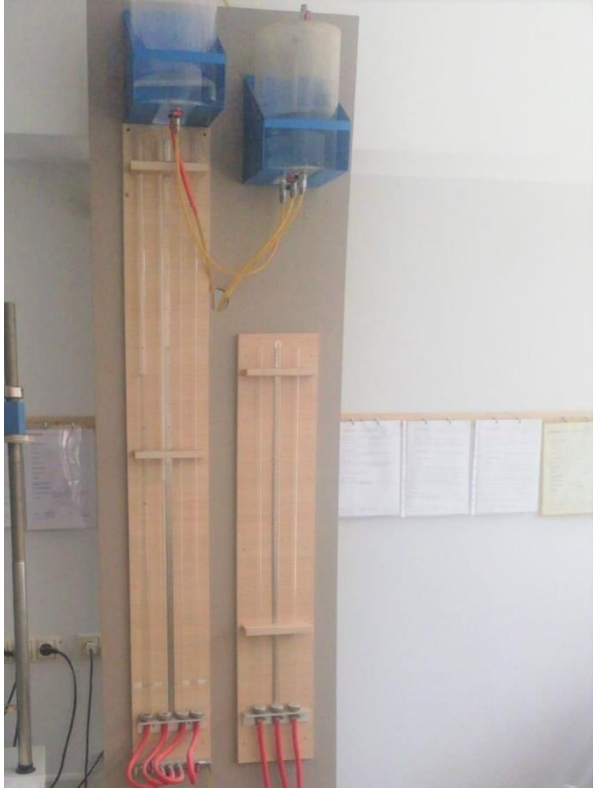
A:numune kesit alanı

D:kalıp çapı, (cm)

H:ilk su seviyesi, (cm)

ΔH :ilk okuma ile son okuma arasındaki su seviyesi farkı, (cm)

t:zaman (sn)' dir.



Şekil 3.11. Permeabilite deney düzeneği

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında ince kum zeminlerin uçucu kül ve çimento ile stabilizasyonu araştırılmıştır. İnce kum zemine farklı oranlarda atık malzeme olan uçucu kül ve sabit bir oranda çimento katılarak hazırlanan numuneler üzerinde deneysel bir çalışma yürütülmüştür.

Belirlenen oranlarda oluşturulan karışım numunelerinin ve katkısız kumun optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri bulunmuştur. Karışımlar belirlenen optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde hazırlanarak kesme kutusu, CBR ve permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, yapılan deneylerin sonuçları özetlenerek değerlendirilmiştir.

4.1. Standart Proktor Deney Sonuçları

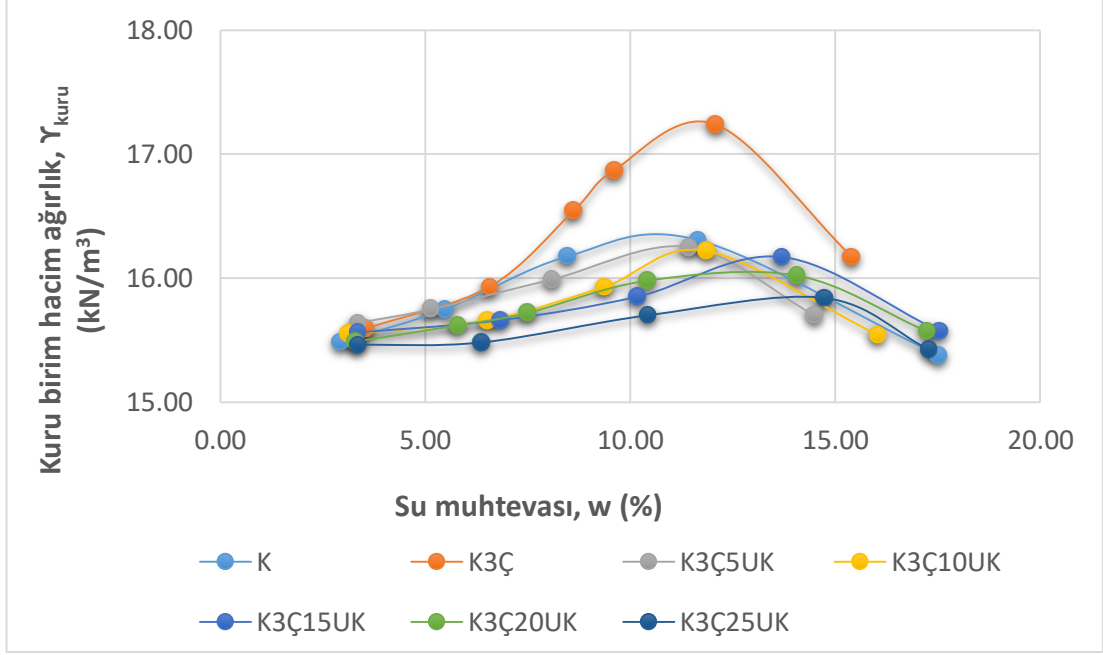
ASTM D698'e göre Standart Proktor deneyleri sonucunda elde edilen optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri tüm numuneler için Çizelge 4.1'de verilmiştir. Ayrıca tüm numunelerin kompaksiyon grafiklerine ait eğriler Şekil 4.1'de sunulmuştur.

İnce kum zemine sabit %3 oranında çimento ve farklı oranlarda uçucu kül katkısıyla hazırlanan karışımların maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri $16,31 \text{ kN/m}^3$ ile $15,84 \text{ kN/m}^3$ arasında değişirken, optimum su içeriği değerleri %11,66 ile %14,74 arasında değişkenlik göstermiştir. Maksimum kuru birim hacim ağırlığın en büyük değeri $17,24 \text{ kN/m}^3$ ile K3Ç numunesinde, en küçük değerinin ise $15,84 \text{ kN/m}^3$ ile K3Ç25UK numunesinde olduğu görülmüştür.

Katkısız kum numunesinin (K) optimum su içeriği %11,66 iken maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 16,31 kN/m³ olarak bulunmuştur. Kum zemine uçucu kül katkısı olmadan yalnızca ağırlıkça %3 oranında çimento eklenerek yapılan kompaksiyon deneyinden K3Ç numunesinin optimum su içeriği %12,07 ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 17,24 kN/m³ olarak elde edilmiştir. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi kum zemine yalnızca %3 oranında eklenen çimentonun maksimum kuru birim hacim ağırlık üzerinde önemli bir etkisi olmuştur. Çimentonun yoğunluğu kumun yoğunluğundan daha fazla olduğundan dolayı maksimum kuru birim hacim ağırlıkta bir artış gözlemlenmiştir. Çimentonun kuma göre daha ince olması ise, karışımın su ihtiyacının artmasına ve dolayısı ile de optimum su içeriğinin artmasına neden olmuştur.

Çizelge 4.1. Standart Proktor deneyi sonuçları

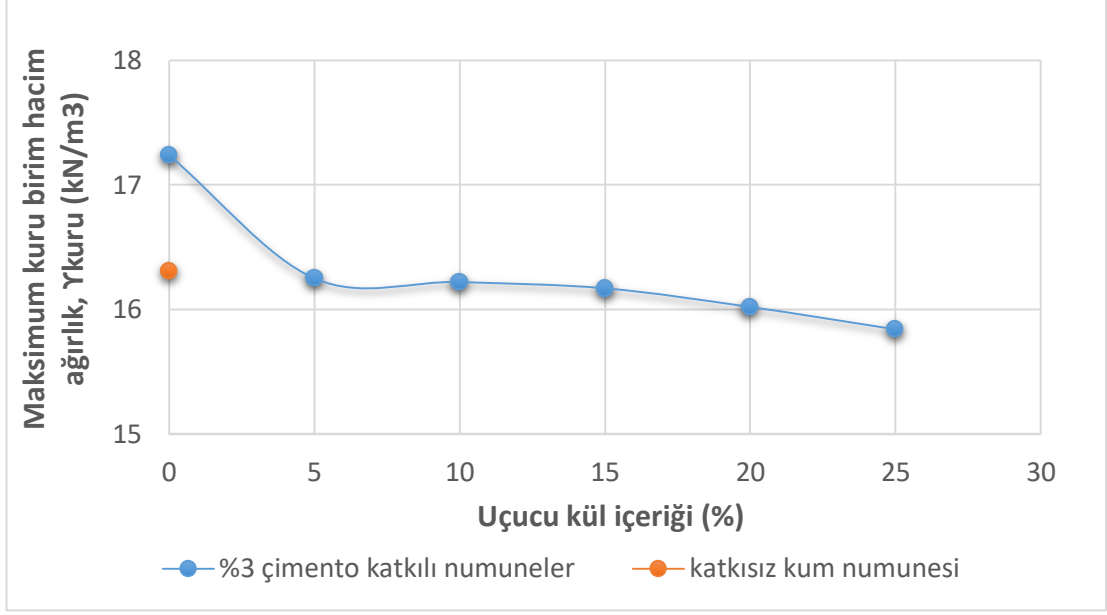
Numune	$\gamma_{kuru,maks}$ (kN/m ³)	w_{opt} (%)
K	16,31	11,66
K3Ç	17,24	12,07
K3Ç5UK	16,25	11,43
K3Ç10UK	16,22	11,85
K3Ç15UK	16,17	13,70
K3Ç20UK	16,02	14,08
K3Ç25UK	15,84	14,74



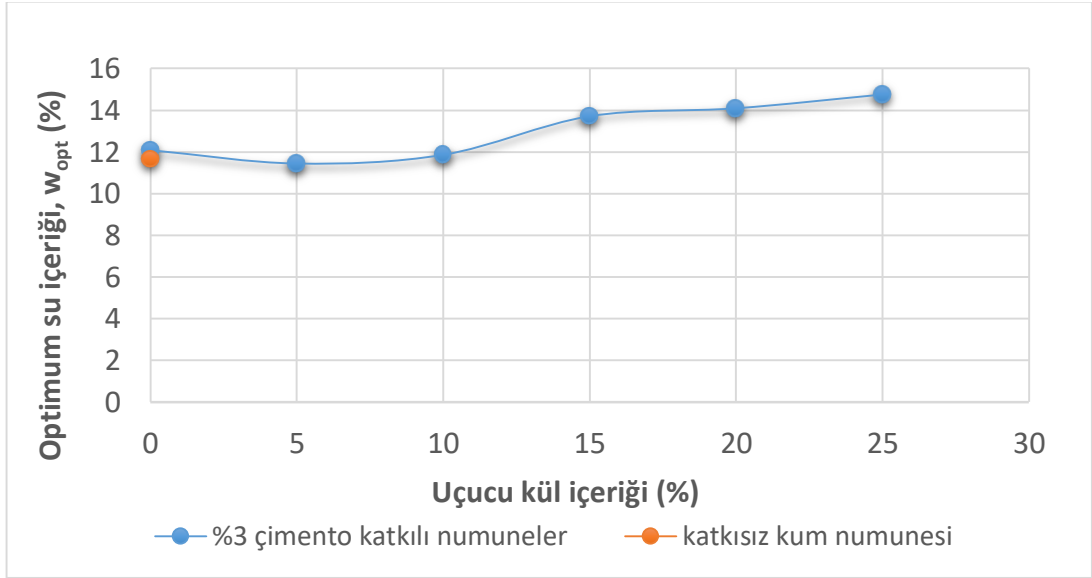
Şekil 4.1. Numunelerin kompaksiyon grafikleri

Karışımlarda sabit %3 oranında çimento ve artan uçucu kül içeriği (%0-25) ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri ($\gamma_{k_{maks}}$) Şekil 4.2’de görüldüğü gibi azalırken, optimum su içeriğinde (w_{opt}) artış olmuştur (Şekil 4.3). Yalnızca K3Ç5UK numunesinin optimum su içeriği %11,43 olarak katkısız kumdan daha düşük bulunmuştur. Mahvash ve ark. (2017) çalışmasında %5 ve %10 uçucu kül katkısında optimum su içeriğinin katkısız kumdan düşük olduğu bir sonuç elde etmişlerdir ve bunun belirgin bir sebebi olmadığını belirtmişlerdir. Uçucu külün atık malzeme olduğundan dolayı davranışının farklılık gösterebileceği düşünülmektedir.

Karışımlara eklenen uçucu külün yoğunluğunun kumdan daha düşük olmasından dolayı uçucu kül katkısı ve artan uçucu kül içeriği için maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri azalmıştır. Uçucu kül katkısı ile optimum su içeriğinde artışın sebebi ise uçucu külün kuma kıyasla daha ince olması ve daha fazla suya ihtiyaç duyması olarak açıklanabilir. Diğer çalışmalarda da zeminlere eklenen uçucu kül katkısı ile benzer bir eğilim bildirmişlerdir (Mahvash ve ark., 2017; Prabakar ve ark., 2004).



Şekil 4.2. Uçucu kül ve çimento katkısının maksimum kuru birim hacim ağırlığa etkisi



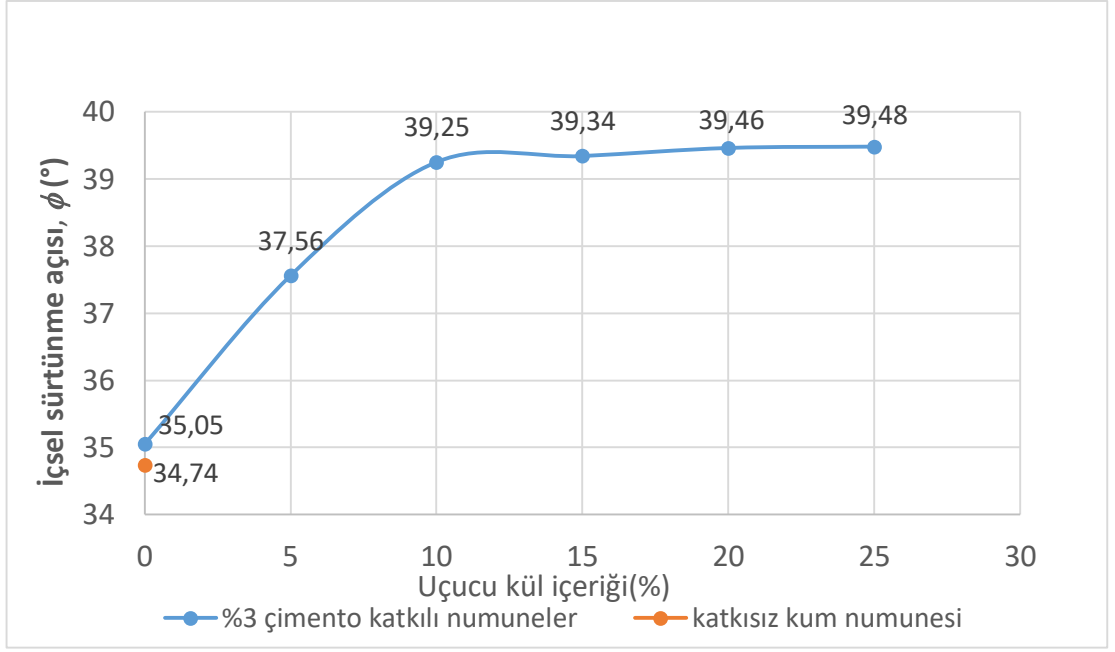
Şekil 4.3. Uçucu kül ve çimento katkısının optimum su içeriğine etkisi

4.2. Kesme Kutusu Deney Sonuçları

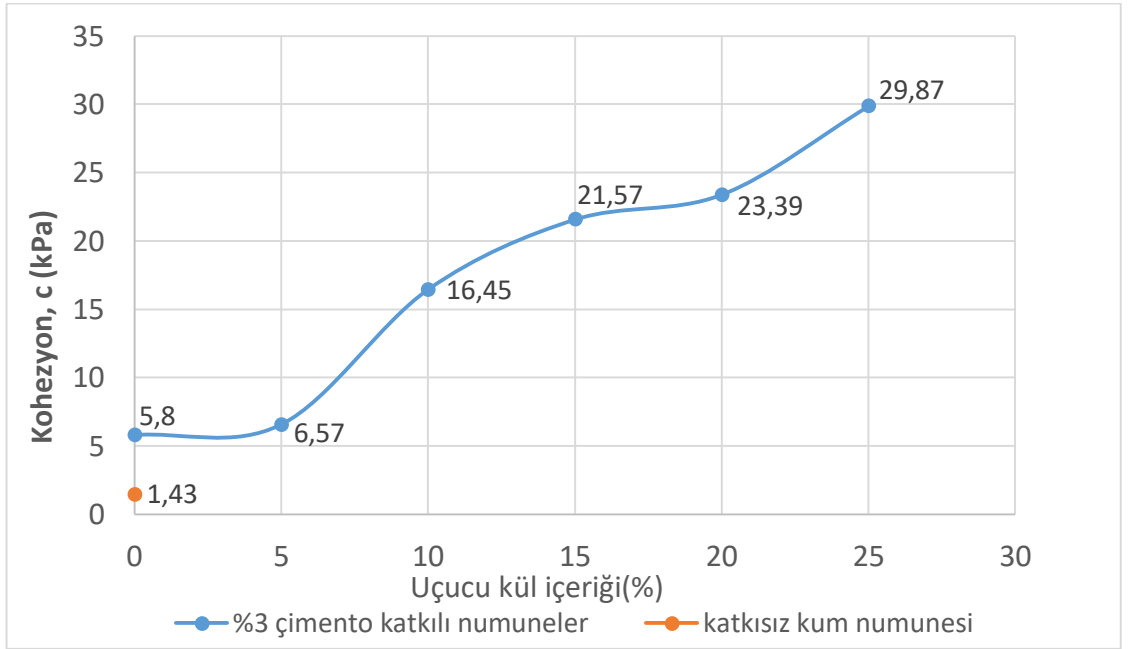
4.2.1. %30 Rölatif Sıklık Sonuçları

Çalışma kapsamında yapılan kesme kutusu deneylerinin ilk setinde gevşek durumu temsil etmesi için kum %30 rölatif sıklıkta hazırlanarak deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'e göre çimento ve uçucu külün içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin gelişimine pozitif olarak etki ederek bu değerlerde artış sağladığı görülmektedir. İçsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin $c=29,87$ kPa ve $\phi= 39,48^\circ$ olarak en fazla %25 uçucu kül katkılı numunede olduğu gözlemlenmiştir. Katkısız kum numunesinin içsel sürtünme açısı $34,74^0$ iken %3 çimento katkısıyla %0,90 oranında artış göstererek $35,05^0$ olmuştur. %30 sıklıktaki ince kum zemine sabit %3 oranında çimento ile birlikte %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında uçucu kül eklendiğinde içsel sürtünme açısı değerleri katkısız kuma kıyasla sırasıyla %8, %13, %13,24, %13,58 ve %13,64 oranında artış göstererek $37,56^\circ$, $39,25^\circ$, $39,34^\circ$, $39,46^\circ$ ve $39,48^\circ$ olarak elde edilmiştir (Şekil 4.4). Bu sonuçlara göre ince kum zemine ağırlıkça sabit %3 oranında akvitvatör olarak katılan çimento ile birlikte farklı oranlarda (%5-25) uçucu kül katkısının %10 uçucu kül katkısından sonra içsel sürtünme açısı değerlerinde önemli bir değişikliğe neden olmadığı sonucuna varılmıştır. Şekil 4.4'te de görülebileceği gibi %10 uçucu kül katkısından sonra karışımların içsel sürtünme açısı değerlerindeki artış oranının azaldığı ve içsel sürtünme açısının neredeyse pek değişmediği söylenebilir.

%30 rölatif sıklıkta hazırlanan karışımların kohezyon değerlerinin de çimento katkısı ve artan uçucu kül içeriği ile arttığı görülmektedir (Şekil 4.5). Katkısız kum numunesinin kohezyon değeri $1,43$ kPa olarak elde edilmiştir. Çimento ve uçucu kül katkılı numunelerin kohezyon değerleri $5,8-29,87$ kPa arasında değişiklik göstermiştir. K3Ç25UK numunesinin kohezyon değeri katkısız kuma kıyasla Grafikten de anlaşılacağı gibi artan uçucu kül muhtevası ile kohezyon artma yönünde eğilim göstermiştir.



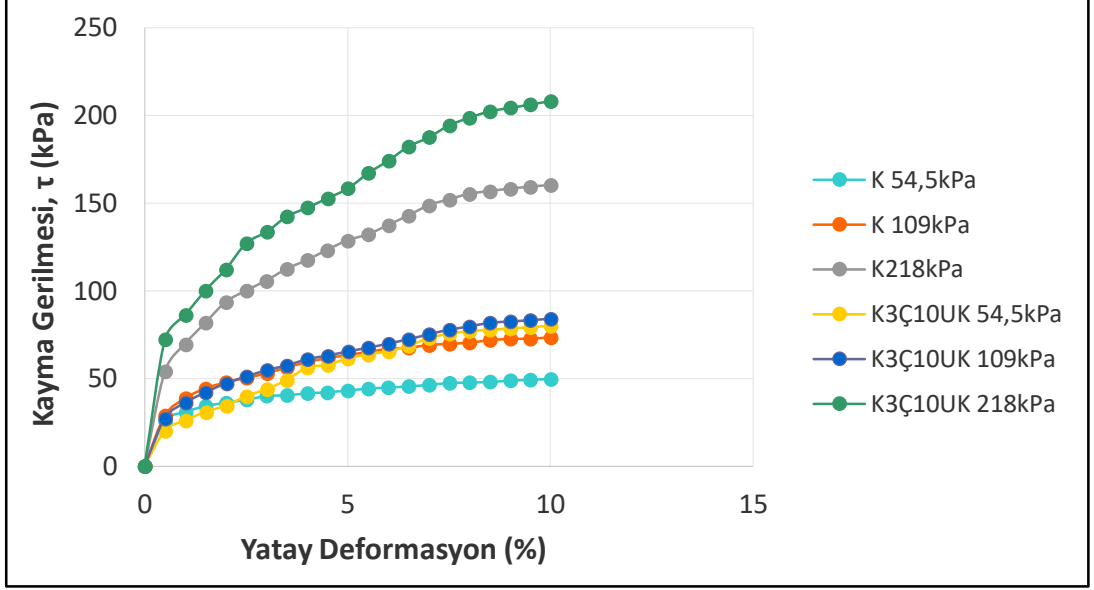
Şekil 4.4. %30 sıklık için numunelerin içsel sürtünme açısı değerleri



Şekil 4.5. %30 sıklık için kohezyon değerleri

Şekil 4.6’da %30 rölatif sıklıkta katkısız kum(K) ve kum+%3çimento+%10 uçucu kül (K3Ç10UK) numunesi için kayma gerilmesi-yatay deformasyon eğrileri sunulmuştur. Şekil 4.6’da verilen K3Ç10UK numunesine ait kayma gerilmesi-yatay deformasyon eğrisine bakıldığında gevşek durumda hazırlanan numunede kayma gerilmelerinin belirgin bir pik oluşturmadan yavaş bir şekilde arttığı görülmektedir. Uygulanan 54,5kPa, 109kPa ve 218kPa yükleme durumlarında numune yenilme durumuna geçmeden kayma dayanımlarında az da olsa artış eğilimi olduğu görülmüştür. Bu sebepten %10’luk yatay deformasyona ulaşan numunelerin yenildiği kabul edilerek kayma gerilmesi-yatay deformasyon eğrisi çizilmiştir. Türer (2014) çalışmasında gevşek kumda benzer bir eğilim bildirmiştir ve bu durumun oluşmasında danelerin kutu duvarına dayanmasının önemli bir etkisinin olduğunu belirtmiştir.

Şekil 4.6’da katkısız kum zeminin 54,5 kPa, 109 kPa ve 218 kPa’lık normal gerilme değerleri altında belirgin bir pik oluşturmadığı ve K3Ç10UK numunesinin davranışına benzer şekilde kayma gerilmelerindeki artışın yavaş bir şekilde de olsa devam ettiği görülmektedir. Katkısız kum numunesi için %10 yatay deformasyona ulaşınca numunenin yenildiği ve pik dayanıma ulaştığı kabul edilerek deney sonlandırılmıştır ve kayma gerilmesi-yatay deformasyon eğrisi çizilmiştir. Ek olarak bu eğriden katkısız kum numunesine kıyasla K3Ç10UK numunesinde 54,5kPa, 109kPa ve 218kPa olarak uygulanan normal gerilme değerleri altında kayma gerilmelerinin daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca, Azaiez ve ark. (2021b) çalışmalarının sonuçları ile uyumlu olarak tüm numunelerde artan normal gerilme değerleri için kayma dayanımlarının arttığı görülmüştür.



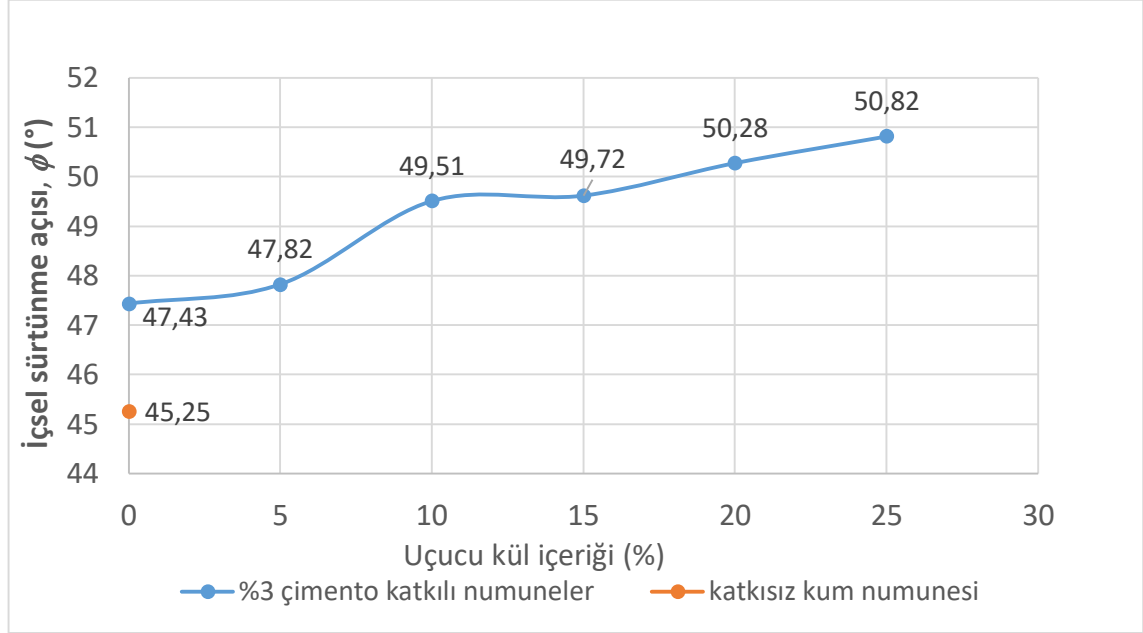
Şekil 4.6. %30 rölatif sıklıkta kum ve K3Ç10UK numunesi için kayma gerilmesi yatay deformasyon eğrisi

4.2.2. %80 Rölatif Sıklık Sonuçları

Çalışma kapsamında yapılan kesme kutusu deneylerinin ikinci setinde sıkı durumu temsil etmesi için kum ve diğer karışımlar %80 rölatif sıklıkta hazırlanarak deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Grafiklerden, çimento ve uçucu külün içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinde artış sağladığı görülmektedir. İçsel sürtünme açısındaki en belirgin artışın K3Ç25UK numunesinde olduğu görülmektedir. Katkısız kum numunesinin içsel sürtünme açısı $45,25^{\circ}$ iken %3 çimento katkısıyla neredeyse %5 oranında artış göstererek $47,43^{\circ}$ olmuştur. %80 sıklıktaki ince kum zemine sabit %3 oranında çimento ile birlikte %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında uçucu kül eklendiğinde içsel sürtünme açısı değerleri katkısız kuma kıyasla sırasıyla %5,67 %9,41 %9,65, %11,11 ve %12,30 oranında artış göstererek $47,82^{\circ}$, $49,51^{\circ}$, $49,72^{\circ}$, $50,28^{\circ}$ ve $50,82^{\circ}$ olarak elde edilmiştir (Şekil 4.7).

Sonuçlar değerlendirildiğinde ince kum zemine ağırlıkça sabit %3 oranında aktivatör olarak katılan çimento ile birlikte farklı oranlarda (%5-25) uçucu kül katkısının %10 uçucu kül katkısından sonra gevşek durumdakine benzer olarak içsel sürtünme açısı değerleri fazla değişmemiştir. Şekil 4.7’den görülebileceği gibi %10 uçucu kül

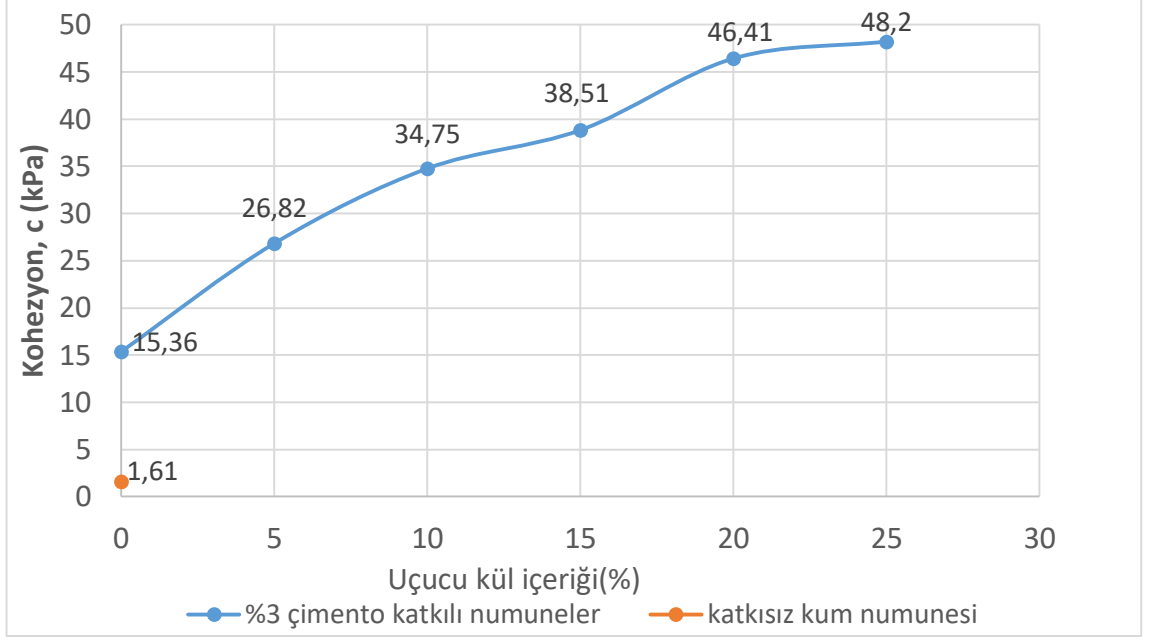
katkısından sonra karışımlarda içsel sürtünme açısı değerlerindeki artışın azaldığı ve artan katkı oranıyla içsel sürtünme açısında önemli bir değişiklik olmadığı söylenebilir.



Şekil 4.7. %80 rölatif sıklık için numunelerin içsel sürtünme açısı değerleri

Çimento ve uçucu kül katkısı kohezyon değerlerini de artırmıştır. Uçucu kül miktarının artmasıyla kohezyon değerlerinin 1,61 kPa'dan 48,2 kPa'ya kadar arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.8). Katkısız kum numunesinin (K) kohezyon değeri 1,61 kPa iken K3Ç, K3Ç5UK, K3Ç10UK, K3Ç15UK, K3Ç20UK ve K3Ç25UK numunelerinin kohezyon değerleri sırasıyla 15,36 kPa, 26,82 kPa, 34,75 kPa, 38,51 kPa, 46,41 kPa ve 48,2kPa olarak elde edilmiştir. Sonuçlardan da anlaşılacağı gibi %3 çimento ile birlikte %20 uçucu kül eklenmesinden sonra kohezyon artış eğiliminde azalma gözlemlenmiştir.

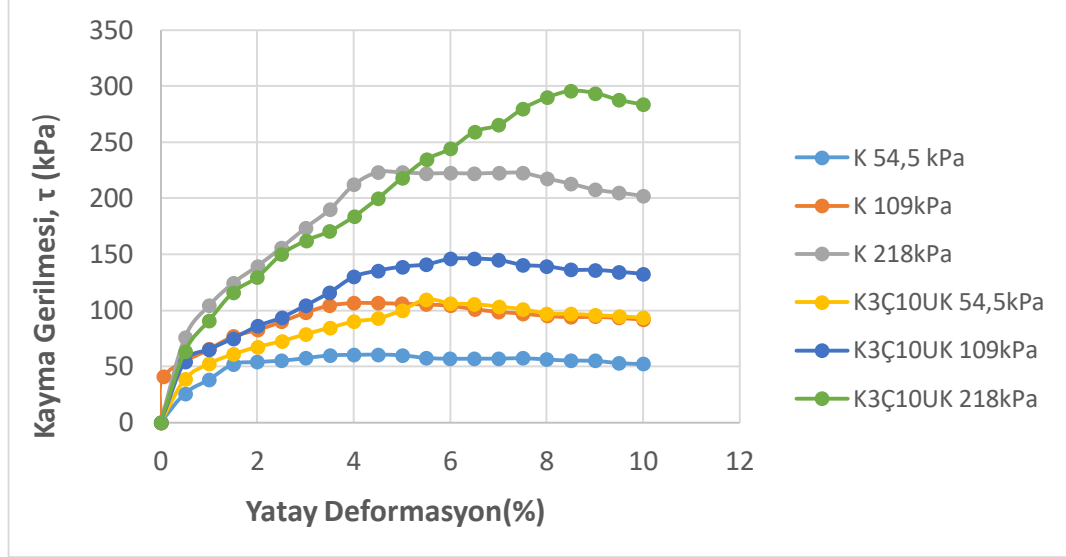
Kum zemine eklenen çimento ve uçucu kül katkısının kohezyonu arttırmakta önemli bir etkisi bulunmaktadır. Bu çalışmada katkı malzemesi olarak kullanılan çimento ve uçucu külün zemindeki boşluklara nüfuz ederek boşlukları doldurup daha kararlı bir yapı oluşturduğu ve bu sayede içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c) değerlerinde artış görüldüğü düşünülmektedir.



Şekil 4.8. %80 sıklık için kohezyon değerleri

Şekil 4.9’da %80 rölatif sıklıkta katkısız kum(K) ve kum+%3çimento+%10 uçucu kül numunesi (K3Ç10UK) için kayma gerilmesi-yatay deformasyon eğrileri sunulmuştur. Şekil 4.9’dan da anlaşılacağı gibi %80 rölatif sıklıkta hazırlanan K3Ç10UK numunesinde 54,5 kPa ve 109 kPa yükleme durumu için %6 gibi bir deformasyon oranında hafif bir pik oluştuğu ve o noktadan sonra kayma dayanımlarının azalma eğilimi gösterdiği görülmektedir. K3Ç10UK numunesinin 218 kPa’lık yükleme durumunda ise belirgin bir pik oluşturduğu (%8.5 deformasyon oranında) sonrasında kayma dayanımlarının azaldığı tipik sıkı zemin davranışı gösterdiği anlaşılmaktadır. Katkısız kum zeminindeyse 54,5 kPa ve 109 kPa normal gerilme değerleri altında belirgin bir pik oluşturmadan daha hafif bir pik yaptığını, 218 kPa’lık normal gerilme değeri altında ise katkılı numunenin davranışına benzer olarak tipik bir sıkı kum davranışı gösterdiği anlaşılmaktadır. Çimento ve uçucu kül katkısı %30 ve %80 rölatif sıklıklarda hazırlanan numunelerin içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerini artırmıştır. Her iki sıklık değeri için %10 uçucu kül katkısından sonra içsel sürtünme açısı değerlerinde önemli artışlar görülmemiştir. Gevşek durumda hazırlanan numunelerin kayma gerilmesi değerleri 54,5kPa, 109kPa ve 218kPa yükleme durumlarında belirgin bir pik yapmadan yavaş bir şekilde artmıştır. Sıkı durumda hazırlanan numuneler 54,5 kPa ve 109 kPa yükleme durumunda %6 gibi bir deformasyonda hafif bir pik oluşturmuştur ve o

noktadan sonra kayma dayanımlarında azalma eğilimi görülmüştür. Sıkı numuneler 218 kPa'lık yüklemde ise belirgin bir pik yaparak tipik sıkı zemin davranışı göstermiştir.



Şekil 4.9. %80 sıklıkta Kum ve K3Ç10UK numuneleri için kayma gerilmesi-yatay deformasyon eğrisi

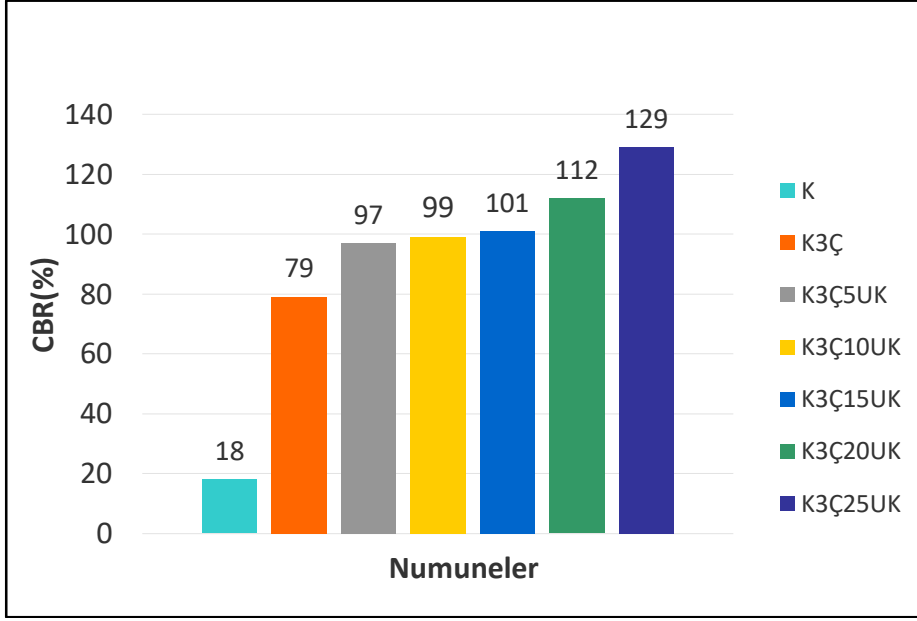
4.3. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR)

Standart Proktor deneyleriyle bulunan optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde hazırlanan numuneler üzerinde kuru ve ıslak CBR deneyleri yapılmıştır. Hazırlanan numuneler 7 ve 28 gün süreyle streçe-sarılı halde kürlenmiştir. Islak CBR deneyleri için belirlenen kür süresini tamamlayan numuneler 4 gün suda bekletildikten sonra test edilmiştir.

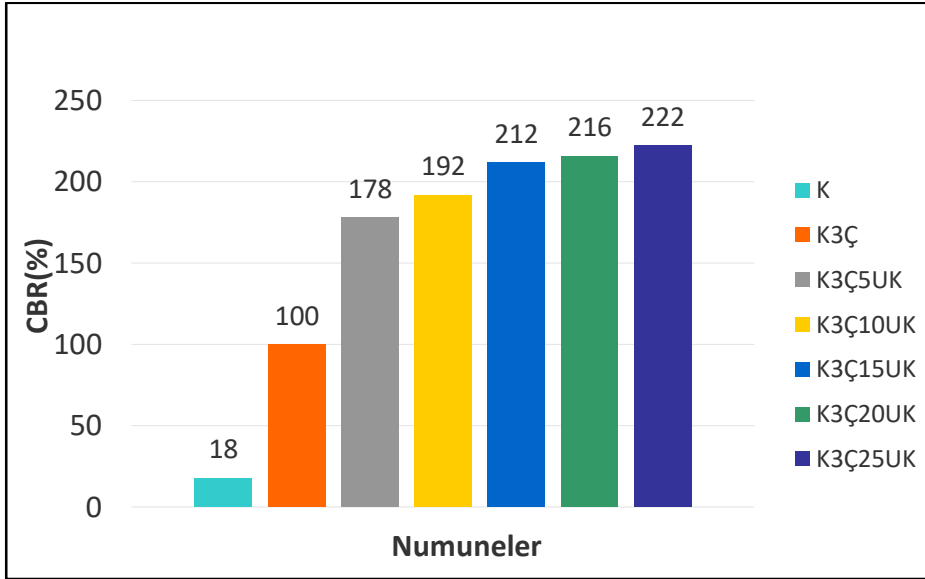
Çalışma kapsamında yapılan kuru CBR deneylerinin 7 ve 28 gün kür süresine ait sonuçları sırayla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Şekil 4.10'de görüldüğü üzere kum zeminin 7 gün sonunda CBR değeri %18 iken, zemine yalnızca %3 çimento ilavesiyle 7 gün kür süresini tamamlayan K3Ç numunesinin CBR değeri %79 olarak ölçülmüştür. Çimento katkısı ince kum zeminin CBR değerini 4 kat artırmıştır. Mahvash ve ark. (2018) çalışmasında çimento katkısının CBR değerlerinin gelişimine önemli bir etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, uçucu kül katkısının da CBR değerini artırdığı

ve artan uçucu kül oranıyla CBR değerinin arttığı Şekil 4.11'e bakıldığında görülmektedir. Kum zemine sabit %3 çimento ile birlikte %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında uçucu kül eklendiğinde CBR değerleri sırasıyla %97, %99, %101, %112 ve %129 olarak bulunmuştur. Uçucu kül katkısıyla 7 gün kür süresinden sonra yapılan testte en büyük CBR değeri K3Ç25UK numunesinde %129 olarak ölçülmüştür. Şekil 4.11'de deney karışımlarının 28 gün kür süresinden sonra yapılan CBR testine ait sonuçlar gösterilmektedir. Kum zeminin 28 gün kür süresi sonunda CBR değeri %18 iken, zemine çimento ilavesiyle 28 gün kür süresini tamamladıktan sonra test edilen K3Ç numunesinin CBR değeri %100 olarak ölçülmüştür. Çimento 28 gün sonunda ince kumun CBR değerini 5 kat artırmıştır. Kum zemine sabit %3 çimento ile birlikte %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında uçucu kül eklendiğinde ise CBR değerleri sırasıyla %178, %192, %212, %216 ve %222 olarak bulunmuştur.

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'e bakıldığında kum zemine çimento katkısının CBR değerini artırdığı, uçucu kül katkısının CBR değeri üzerinde pozitif bir etkisinin olduğu ve artan uçucu kül oranıyla karışımların CBR değerinin arttığı görülmektedir. Prabakar ve ark. (2004) zeminlere uçucu kül eklenmesiyle CBR değerindeki artışın uçucu kül ve zeminin birbirine kenetlenme fenomeninin işlevi olduğunu bildirmişlerdir. Kür süresinin karışımların CBR değeri üzerinde önemli bir etkisinin olduğu anlaşılmıştır. Kür süresi ile CBR değerindeki artışın karışımlarda bulunan çimentonun hidrasyon reaksiyonu ve uçucu külün yavaş gerçekleşen puzolanik reaksiyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir.



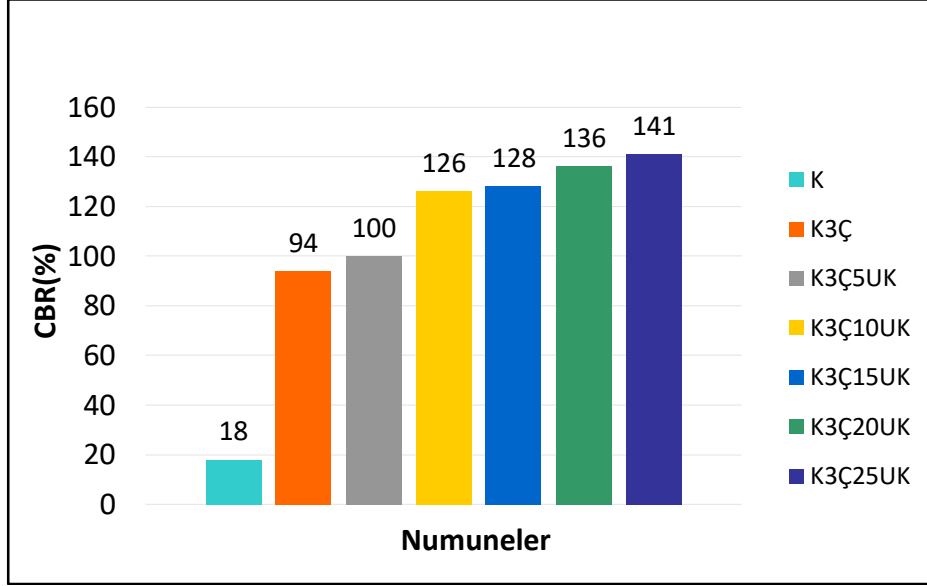
Şekil 4.10. Deney karışımlarının 7 gün kür sonrası kuru CBR sonuçları



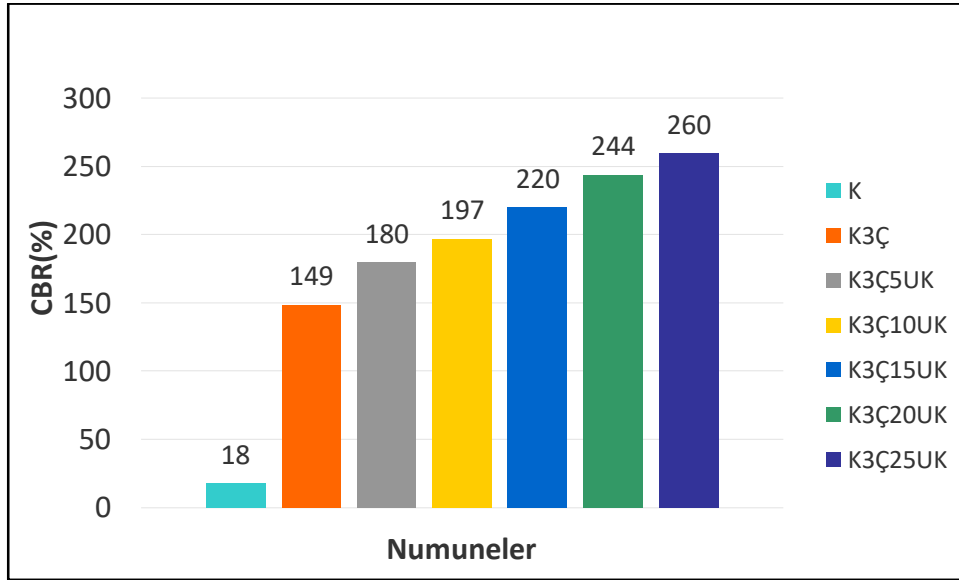
Şekil 4.11. Deney karışımlarının 28 gün kür sonrası kuru CBR sonuçları

Katkısız kum zemin ile çimento ve uçucu kül katkıları numunelere ait olan ıslak CBR deney sonuçları Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te gösterilmektedir. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'e göre çimento ve uçucu kül katkısının 7 ve 28 gün kür sonrası karışımların ıslak CBR değerini artırdığı sonucuna varılmaktadır. Artan uçucu kül içeriği ve kür süresi numunelerin ıslak

CBR değerlerini artırmıştır. Islak CBR deneylerinde tüm karışımlarda 4 gün suda bekletildikten sonra şişme olmadığı gözlemlenmiştir



Şekil 4.12. Deney karışımlarının 7 gün kür sonrası ıslak CBR sonuçları



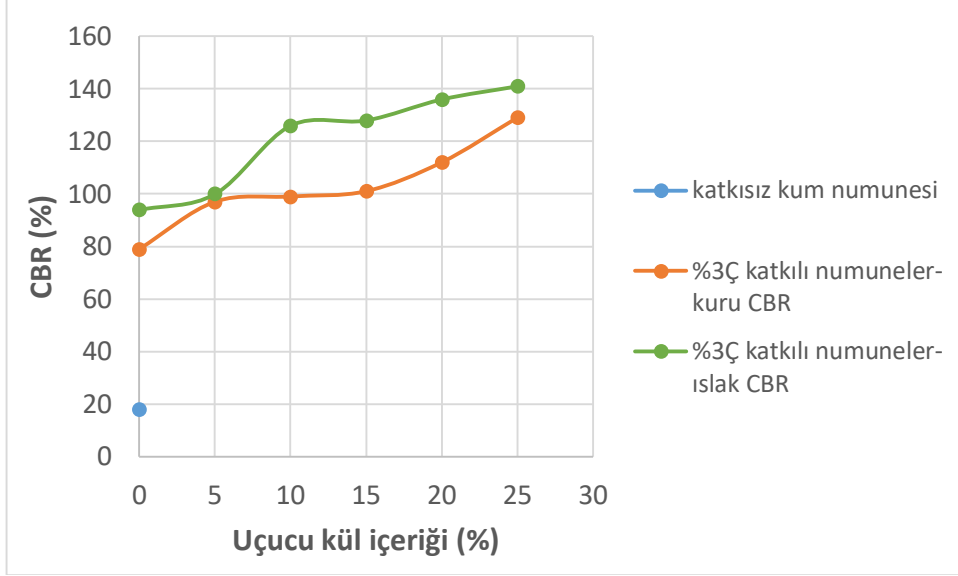
Şekil 4.13. Deney karışımlarının 28 gün kür sonrası ıslak CBR sonuçları

Kuru ve ıslak CBR değerleri birlikte değerlendirildiğinde, ıslak CBR değerlerindeki artış davranışının kuru CBR deney sonuçlarına benzer olduğu görülmüştür, bununla birlikte 7

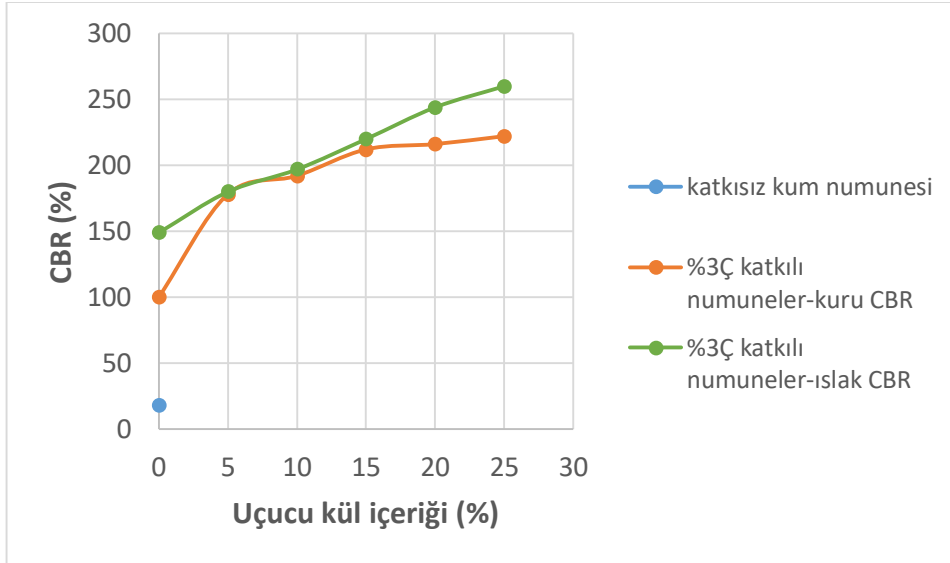
ve 28 günlük kür süresi için ıslak CBR değerlerinin kuru CBR değerlerinden daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Kullanılan katkı malzemelerinin su varlığında reaksiyonlarını gerçekleştirmesinin buna neden olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.14'te görüldüğü gibi 7 gün kür sonrası kuru CBR değeri %97, ıslak CBR değeri ise %100 olan K3Ç5UK numunesinin kuru ve ıslak CBR değerleri arasında önemli bir fark meydana gelmemiştir. K3Ç numunesinin 7 günlük kür sonrası kuru CBR değeri %79 iken aynı kür süresinde ıslak CBR değeri %94'e yükselmiştir. %3 çimento ile birlikte %25 uçucu kül kullanıldığında ise kuru ve ıslak CBR değerleri sırasıyla %129 ve %141'e ulaşmıştır. Şekil 4.14'e göre 7 gün kür süresi sonunda %3 çimento ile birlikte %10, %15 ve %20 oranlarında uçucu kül içeren numunelerin kuru ve ıslak CBR değerleri arasındaki fark daha fazladır. K3Ç10UK numunesi için 7 gün kür sonrası kuru CBR değeri %99 iken aynı kür süresindeki ıslak CBR değeri %126 olmuştur. K3Ç15UK numunesi için 7 gün sonrası kuru CBR değeri %101 iken aynı kür süresindeki ıslak CBR değeri %128 olarak bulunmuştur. K3Ç20UK numunesi için 7 gün sonrası kuru CBR değeri %112 iken aynı kür süresindeki ıslak CBR değeri %136 olarak bulunmuştur. Aynı numunelerde 28 gün kür sonrası kuru ve ıslak CBR değerlerine bakıldığında ise belirgin bir fark meydana gelmediği bu oranlarda kuru ve ıslak CBR değerlerinin birbirine daha yakın olduğu görülmektedir (Şekil 4.15).

Şekil 4.15'e bakıldığında, K3Ç5UK numunesi için 28 gün sonrası kuru CBR değeri %178 iken aynı kür süresindeki ıslak CBR değeri %180 olarak bulunmuştur. K3Ç10UK numunesi için 28 gün sonrası kuru CBR değeri %192 iken aynı kür süresindeki ıslak CBR değeri %197 olarak bulunmuştur. K3Ç5UK ve K3Ç10UK numunelerinin 28 gün kür süresi için kuru ve ıslak CBR değerleri arasında belirgin bir fark oluşmadığı anlaşılmıştır. K3Ç numunesinin 28 günlük kür sonrası kuru CBR değeri %100 iken aynı kür süresinde ıslak CBR değeri %149'ya yükselmiştir ve bu sayede çimentonun CBR değeri üzerinde önemli bir etkisinin olduğu, kür süresinin de bu etkiyi arttırdığı sonucuna varılmıştır. %3 çimento ile birlikte %25 uçucu kül kullanıldığında ise kuru ve ıslak CBR değerleri sırasıyla %222 ve %260'a ulaşmıştır, yani %25 uçucu kül katkısı çimentonun etkisini %75 oranında artırmıştır.



Şekil 4.14. 7 gün kür sonrası %3Ç ve UK katkıli numuneler



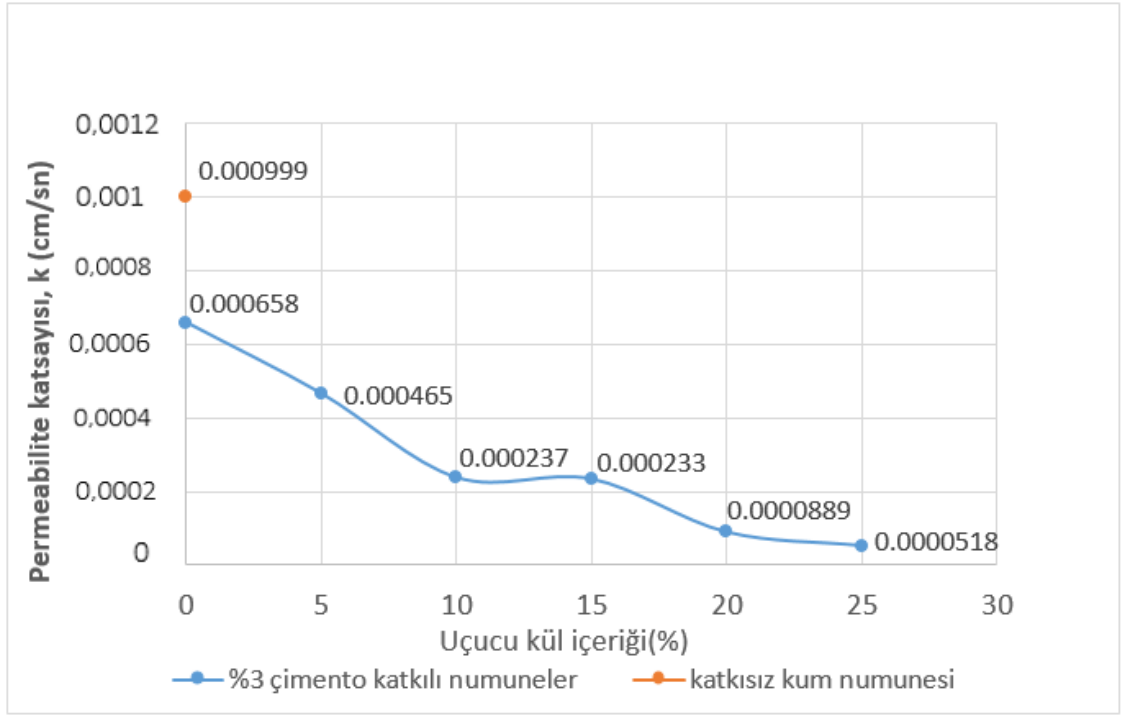
Şekil 4.15. 28 gün kür sonrası %3Ç ve UK katkıli numuneler

4.4. Permeabilite Deney Sonuçları

Numunelerin düşen seviyeli permeabilite deney sonuçları Çizelge 4.2’de ve Şekil 4.16’da verilmiştir. Permeabilite katsayısının en düşük değeri $5,18 \times 10^{-5}$ cm/s olarak K3Ç25UK numunesinde belirlenmiştir. En büyük permeabilite katsayısı ise $9,99 \times 10^{-4}$ cm/s olarak katkısız kum numunesi olan K numunesinde gözlemlenmiştir. Kum zemine yalnızca çimento katkısıyla, permeabilite katsayısı(k) katkısız kuma kıyasla %34 oranında azalarak K3Ç numunesinde $6,58 \times 10^{-4}$ cm/s olmuştur. Kum ve ağırlıkça %3 çimento karışımına %5 oranında uçucu kül eklendiğinde (K3Ç5UK) ise permeabilite katsayısı katkısız kuma kıyasla %53 oranında azalarak $4,65 \times 10^{-4}$ cm/s olmuştur. K3Ç25UK numunesinde ise permeabilite katsayısı katkısız kuma kıyasla %94 oranında azalarak $5,18 \times 10^{-5}$ cm/s olmuştur (Şekil 4.16). Numunelere eklenen çimento ve uçucu kül içeriği ve artan uçucu kül oranı numunelerin permeabilite katsayısını azaltmıştır. Çimento ve uçucu kül kum zemine eklendiğinde kum daneleri arasındaki boşlukları doldurup zeminin daha boşluksuz ve sıkı bir yapı oluşturmasını sağlayarak permeabiliteyi azaltıcı yönde etki göstermiştir.

Çizelge 4.2. Permeabilite deney sonuçları

Numuneler	Permeabilite Katsayısı (cm/s)
K	$9,99 \times 10^{-4}$
K3Ç	$6,58 \times 10^{-4}$
K3Ç5UK	$4,65 \times 10^{-4}$
K3Ç10UK	$2,37 \times 10^{-4}$
K3Ç15UK	$2,33 \times 10^{-4}$
K3Ç20UK	$8,89 \times 10^{-5}$
K3Ç25UK	$5,18 \times 10^{-5}$



Şekil 4.16. Permeabilite deney sonuçları

5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, uçucu kül ve çimentonun ince kum zeminin geoteknik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. İnce kum zemine stabilizatör olarak ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında uçucu kül, aktivatör olarak sabit %3 oranında çimento katılarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan katkılı numunelere ve katkısız kum numunesine kompaksiyon deneyleri yapılarak numunelerin optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri bulunmuştur. Optimum su içeriğinde hazırlanan katkısız kum numunesine ve katkılı numunelere kesme kutusu, CBR ve permeabilite deneyleri yapılarak uçucu kül ve çimento katkısının ince kum zeminlerin geoteknik özellikleri üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Kompaksiyon deneylerinin sonuçlarına bakıldığında katkısız kum numunesinin optimum su içeriği %11,66 maksimum kuru birim hacim ağırlığı $16,31 \text{ kN/m}^3$ olarak bulunmuştur. Kum zemine yalnızca %3 oranında çimento katıldığında ise optimum su içeriği %12,07 maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri ise $17,24 \text{ kN/m}^3$ olmuştur. Bu sonuçlardan çimentonun kum zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri üzerinde önemli bir etkisinin olduğu anlaşılmıştır. Çimentonun özgül ağırlığının kumdan daha fazla olduğundan dolayı maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde artışa neden olmuştur. Kuma kıyasla inceliği daha fazla olan çimento, karışımın su ihtiyacını artırarak optimum su içeriğinde de artışa neden olmuştur.
- Mevcut sabit %3 oranında çimento katkısı ile birlikte kum zemine ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 uçucu kül eklendiğinde numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinin katkısız kum numunesine kıyasla sırasıyla %0,36, %0,55, %0,85, %1,77 ve %2,88 oranında azalarak $16,25-15,84 \text{ kN/m}^3$ aralığında değişiklik göstermiştir. Maksimum kuru birim hacim ağırlığındaki bu azalma eğiliminin uçucu külün düşük özgül ağırlığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Çimento ve artan oranlarda uçucu kül katkısı K3Ç5UK numunesi hariç numunelerin optimum su içeriğini artırmıştır. Uçucu kül ve çimentonun kum zemine kıyasla daha ince olması ve daha fazla su ihtiyacının olmasının bu artışa neden olduğu düşünülmektedir.
- Kesme kutusu deneylerinde gevşek durumu temsil etmesi amacıyla %30 rölatif sıklıkta numuneler hazırlanmıştır, sıkı durumu temsilen ise %80 rölatif sıklıkta numuneler hazırlanmıştır. Kesme kutusu deney sonuçlarına bakıldığında uçucu kül ve çimento katkısının kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerini artırdığı görülmüştür. Uçucu kül ve çimentonun zemin boşluklarını doldurup daha yoğun ve kararlı bir yapı oluşturduğu ve bu sayede kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin artış gösterdiği düşünülmektedir. %30 rölatif sıklık değeri için içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin $c=29,87$ kPa ve $\phi=39,48^\circ$ olarak en fazla %25 uçucu kül katkılı numunede olduğu gözlemlenmiştir. %80 rölatif sıklık değeri için içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri $c=48,20$ kPa ve $\phi=50,82^\circ$ olarak en fazla %25 uçucu kül katkılı numunede elde edilmiştir. %30 ve %80 rölatif sıklıkta hazırlanan numunelerin kesme kutusu deney sonuçlarından her iki sıklık değeri için %10 uçucu kül katkısından sonra karışımların içsel sürtünme açısı değerlerindeki artış oranının azaldığı ve içsel sürtünme açısının neredeyse pek değişmediği gözlemlenmiştir.
- Taşıma oranı tayini (CBR) deneylerinden, çimento ve uçucu kül katkısının numunelerin hem kuru hem ıslak CBR değerlerinde artış sağladığı görülmüştür. Katkısız kum numunesinin (K) CBR değeri %18 iken, K3Ç numunesinin 7 gün kürden sonra kuru CBR değeri 4 kat artış göstererek %79, K3Ç5UK numunesinin aynı kür süresi için kuru CBR değeri %97 olarak elde edilmiştir. Çimentonun CBR değeri üzerinde önemli bir etkisinin olduğu, uçucu kül katkısının ise bu etkiyi olumlu yönde desteklediği tespit edilmiştir.
- CBR değerleri artan oranlarda uçucu kül katkısı ile artış göstermiştir. Mevcut sabit %3 oranında çimento katkısı ile birlikte kum zemine ağırlıkça %5 -%25 uçucu kül eklendiğinde numunelerin 7 gün kürden sonra kuru CBR değerleri %18-%129 arasında değişirken, ıslak CBR değerleri ise aynı kür süresi için %100-%141 arasında değişkenlik göstermiştir. Aynı numunelerin 28 gün kürden sonra kuru CBR değerleri %178-%222 arasında değişirken, ıslak CBR değerleri

ise aynı kür süresi için %180-%260 aralığında elde edilmiştir. Bu sonuçlardan kür süresinin numunelerin CBR değerinin gelişiminde önemli bir etken olduğu anlaşılmıştır. Kür süresi ile CBR değerindeki artışın nedeni, çimentonun hidrasyon reaksiyonlarından ve puzolanik özellik gösteren uçucu külün içerisinde bulunan kimyasal bileşenlerin zamana bağlı olarak yavaş gerçekleşen puzolanik reaksiyona girmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, bu sonuçlara göre uçucu kül ve çimento katkılı numunelerin 7 ve 28 gün kür süresi için ıslak CBR değerlerinin kuru CBR değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu davranışa kullanılan katkı malzemelerinin su varlığında reaksiyonlarını gerçekleştirerek bağlayıcılık özelliği kazanmasının neden olduğu düşünülmektedir.

- Permeabilite deney sonuçlarından, katkısız kum numunesinde permeabilite katsayısı $9,99 \times 10^{-4}$ cm/s bulunmuştur. Çimento ve artan oranlarda uçucu kül katkısı ile numunelerin permeabilitesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Permeabilite katsayısının en düşük değeri ise $5,18 \times 10^{-5}$ cm/s olarak K3Ç25UK numunesinde elde edilmiştir. Kum zemine eklenen çimento ve uçucu kül incelikleri sayesinde zemin boşluklarını doldurarak daha gözeneksiz bir yapı oluşturmuştur ve permeabiliteyi azaltıcı yönde bir etki göstermiştir.

Tez çalışması kapsamında yapılan deneyler neticesinde ince kum zemine aktivatör olarak çimento ve stabilizatör olarak eklenen uçucu kül katkısının kumun kohezyon, içsel sürtünme açısı ve CBR değerine pozitif olarak etki ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca çimento ve uçucu kül katkısı ile kum zeminin permeabilitesi de azalarak iyileşme göstermiştir. Sonuç olarak bu çalışmada ince kum zemine eklenen uçucu kül katkısının zeminin geoteknik özelliklerinde iyileşme sağladığı ve uçucu külün kum zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılabileceği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmanın devamı niteliğinde farklı dane boyutlarında kum kullanılarak çimento ve uçucu kül katkısının değişen dane boyutlarında nasıl bir performans sergilediği incelenebilir. Deney karışımlarında aktivatör olarak çimento yerine kireç kullanılabilir veya her ikisinin kullanımı ile numuneler için en uygun aktivatörün seçimi araştırılabilir. CBR deneylerinde kür süresi artırılabilir, özellikle uçucu külün yavaş gerçekleşen

puzolanik reaksiyonundan dolayı 90 gün kür süresinden sonraki performansı değerlendirilebilir. Katkılı malzeme araziye serilerek belirli kür sürelerinden sonra dayanımı ölçülebilir. Kesme kutusu deneylerinde kür koşullarının etkisi incelenebilir. Farklı boyutlarda kesme kutusu kullanılarak içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerine etkisi incelenebilir. İnce kum zemine stabilizatör olarak uçucu kül ve aktivatör olarak çimento katılarak dinamik yükler altındaki performansı araştırılabilir.

KAYNAKLAR

Al-Aghbari, M. Y., Mohamedzein, Y. A., & Taha, R. (2009). Stabilisation of desert sands using cement and cement dust. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 162(3), 145-151.

Alkaya, D. (2009). Uçucu küllerin zemin iyileştirmesinde kullanılmasının incelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(1), 61-72.

Amini, Y., & Hamidi, A. (2014). Triaxial shear behavior of a cement-treated sand–gravel mixture. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(5), 455-465.

ASTM C128, (2015). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C618, (2003). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.” Annual Book of ASTM Standards.

ASTM D1883, (2016). Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. *Astm International*, West Conshohocken, PA.

ASTM D2487, (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (unified soil classification system). *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM D3080, (2011). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM D4253, (2006). Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table. (2006). *ASTM International*, Pennsylvania, USA.

ASTM D4254, (2006). Standard Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density. *ASTM International*, Pennsylvania, USA.

ASTM D5856, (2015). Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall Compaction Mold Permeameter. *Astm International*, West Conshohocken, PA.

ASTM D698, (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

Ayan, E. (2009). Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Uygulamadan Örnekler. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Aytekin, M. (2004). *Deneysel Zemin Mekaniği*. Teknik Yayınevi.

Azaiez, H., Cherif Taiba, A., Mahmoudi, Y., & Belkhatir, M. (2021b). Shear characteristics of fly ash improved sand as an embankment material for road infrastructure purpose. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(3), 1-14.

Azaiez, H., Taiba, A. C., Mahmoudi, Y., & Belkhatir, M. (2021a). Characterization of granular materials treated with fly ash for road infrastructure applications. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 8(2), 228-253.

Babu, N., & Poulouse, E. (2018). Effect of lime on soil properties: A review. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(11).

Bergado, D. T., Anderson, L. R., Miura, N., & Balasubramaniam, A. S. (1996). Soft ground improvement in lowland and other environments. ASCE press.

Blissett, R. S., & Rowson, N. A. (2012). A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel*, 97, 1-23.

Braja, M. D. (2007). *Principles of Foundation Engineering*. PWS.

Burke, G. K. (2004). Jet grouting systems: advantages and disadvantages. In *GeoSupport 2004, Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods, and Specialty Foundation Systems*, December 29-31, Orlando, USA.

Çiçek, T. (1999). Kireç ve kullanımı. *3.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 14-15 Ekim 1999, İzmir, Türkiye.

Demiröz, A., & Karaduman, M. (2009). Zemin iyileştirme metotları. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 8(3), 176-192.

Diamond, S., & Kinter, E. B. (1965). Mechanisms of soil-lime stabilization. *Highway research record*, 92, 83-102.

Erdil, B. (2008). Jet Grout Kolonu Tasarım Taşıma Gücü Hesabı. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Forcelini, M., Garbin, G. R., Faro, V. P., & Consoli, N. C. (2016). Mechanical behavior of soil cement blends with Osorio sand. *Procedia engineering*, 143, 75-81.

Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., & Mordoğan, H. (2005). Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları. Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, 9-12 Haziran 2005, İzmir, Türkiye.

Haeri, S. M., Hosseini, S. M., Toll, D. G., & Yasrebi, S. S. (2005). The behaviour of an artificially cemented sandy gravel. *Geotechnical & Geological Engineering*, 23(5), 537-560.

Hausmann, M.R. (1990). *Engineering Principles of Ground Modification*. McGraw Hill.

Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice-Hall, New Jersey Englewood Cliffs.

Ige, J. A., Ajamu, S. O., (2015). Unconfined compressive strength test of a fly ash stabilized sandy soil. *International Journal of Latest Research in Engineering and Technology*, 1(3), 1-11.

İLA, International Lime Association (1999). Use of Lime. Arlington, U.S.A. <https://www.internationallime.org/>

Kaçmaz, U.D. (2019). Mermer Tozu ve Uçucu Külün Zemin İyileştirmede Kullanımı. *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

Kalıpcılar, İ., Mardani-Aghabaglou, A., İnan Sezer, G., Sezer, A., & Altun, S. (2015). Çimento stabilize kilin sülfat etkisi altında dayanım ve geçirimsizlik özellikleri. 6. *Geoteknik Sempozyumu*, 26-27 Kasım 2015, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye.

Kanıt, R. (2003). *Temel İnşaatı*. Gazi Kitabevi.

Kaniraj, S. R., & Havanagi, V. G. (1999). Compressive strength of cement stabilized fly ash-soil mixtures. *Cement and concrete research*, 29(5), 673-677.

Kaptan, E. C., Çınar, F. T., & Bozbey, İ. (2021). Derin karıştırma yöntemi (DSM) ile iyileştirilen zeminlerde elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişkinin incelenmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(3), 286-296.

Keramatikerman, M., Chegenizadeh, A., & Nikraz, H. (2017). Experimental study on effect of fly ash on liquefaction resistance of sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 93, 1-6.

Kolay, P. K., Puri, V. K., Lama Tamang, R., Regmi, G., & Kumar, S. (2019). Effects of fly ash on liquefaction characteristics of Ottawa sand. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5(2), 1-14.

Kumar, A. (2018). A Review on Soil Stabilization in Road Construction by Using Bituminous Mixture, *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 5(1).

Little, D. N., Thompson, M. R., Terrell, R.L., Epps, J. A., & Barenberg, E. J. (1987). Soil Stabilization For Roadways And Airfields. Engineering & Services Laboratory Air Force Engineering & Services Center Tyndall Air Force Base, Florida, USA.

Little, D.N., & Nair, S. (2009). NCHRP Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials. Texas Transportation Institute Texas A&M University , Texas, USA.

Mahvash, S., López-Querol, S., & Bahadori-Jahromi, A. (2017). Effect of class F fly ash on fine sand compaction through soil stabilization. *Heliyon*, 3(3).

Mahvash, S., López-Querol, S., & Bahadori-Jahromi, A. (2018). Effect of fly ash on the bearing capacity of stabilised fine sand. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 171(2), 82-95.

Makusa, G. P. (2012). Soil Stabilization Methods and Materials in Engineering State of the Art Review, Department of Civil, Environmental and Natural Resources, Division of Mining and Geotechnical Engineering, Lulea University of Technology, Sweden.

Miao, L., Chen, G., & Hong, Z. (2006). Application of dynamic compaction in highway: a case study. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24(1), 91-99.

Motamedi, S., Song, K. I., & Hashim, R. (2015). Prediction of unconfined compressive strength of pulverized fuel ash–cement–sand mixture. *Materials and Structures*, 48(4), 1061-1073.

Nagy, L., Tabácks, A., Huszák, T., Mahler, A., & Varga, G. (2013). Comparison of permeability testing methods. In *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, September, Paris.

Nalçakan, M. S. (2004). Problemlı zeminlerde geoteknik çözümler. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 430(2004), 2.

Nicholson, P. G. (2014). *Soil Improvement and Ground Modification Methods*. Butterworth Heinemann.

Onur, M. İ., Tuncan, A., Kılıç, H. O., & Tuncan, M. (2016). Yeni bir derin zemin karıştırma sistemi tasarımı ve arazi uygulamaları. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 9(3), 194-205.

Öksüz, K. (2006). Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı. *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Özaydın, K. (2012). Zeminlerin iyileştirilmesi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresi*, 4-5 Ekim 2012, İstanbul, Türkiye.

Özaydın, K. (2016). *Zemin Mekaniği*. Birsen Yayınevi.

Özcan, U., & Güngör, S. (2019). Sürdürülebilir bir yöntem/betonda puzolan kullanımını. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (15), 176-182.

Özdemir, A., & Özdemir, M. (2006). Zayıf zeminlerin iyileştirilmesi ve son yıllarda yaygın olarak uygulanan bazı zemin iyileştirme yöntemleri. *Sondaj Dünyası Dergisi*, 3, 34-38.

Prabakar, J., Dendorkar, N., & Morchhale, R. K. (2004). Influence of fly ash on strength behavior of typical soils. *Construction and Building Materials*, 18(4), 263-267.

Saha, S., & Pal, S. K. (2013). Influence of fly ash on unconfined compressive strength of soil and fly ash layers placed successively. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18(H), 1593-1602.

Sahu, B.K., (2001). Improvement in California bearing ratio of various soils in Botswana by fly ash. *International Ash Utilization Symposium*, University of Kentucky, USA.

Salunkhe, A., Adethya, V. S., Gobinath, R., Prasanth, J. H., & Karthikeyan, S. (2022). Shear behaviour of cement treated sand. *Materials Today: Proceedings*, 68, 1266-1272.

Santos, O. F., Lopes, F., Costa, Y. D. J., & Costa, C. M. L. (2014). Effect of Cement Content on the Behavior of Dune Sand-Cement Admixtures. In *Advanced Materials Research* (Vol. 838, pp. 697-700). Trans Tech Publications Ltd.

Simatupang, M., Mangalla, L. K., Edwin, R. S., Putra, A. A., Azikin, M. T., Aswad, N. H., & Mustika, W. (2020). The mechanical properties of fly-ash-stabilized sands. *geosciences*, 10(4), 132.

Stulz, R. & Mukerji, K. (1993). *Appropriate Building Materials: a Catalogue of Potential Solutions*. Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management.

Sumesh, M., Kalita, A., & Singh, B. (2010). An experimental investigation on strength properties of fly ash blended soils treated with cement. *J. Environ. Res. Dev*, 5(2), 322-329.

Suzuki, M., Fujimoto, T., & Taguchi, T. (2014). Peak and residual strength characteristics of cement-treated soil cured under different consolidation conditions. *Soils and Foundations*, 54(4), 687-698.

Şengezer, L. (2010). Granüler Zeminlerde Dinamik Kompaksiyon Uygulaması. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Şengül, E. (2010). Yüksek Su Muhtevalı Killi Yol Taban Zemininin Kireç Stabilizasyonu ve Hücresel Dolgu Sistemiyle İyileştirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Tangüler, M., Gürsel, P., & Meral, Ç. (2015). Türkiye’de uçucu küllü betonlar için yaşam döngüsü analizi. 9. *Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, Türkiye.

Tangüler, M., Meral, Ç., & Aslam, I. (2014). Early-age performance of binary fly ash-portland cement blends. In *Eurasia 2014 Waste Management Symposium*, 28-30 April, İstanbul, Turkey.

Tokyay, M. (2013). Betonda uk, gyfc ve sd’nin rolü: mevcut bilgi birikimi. *Hazır Beton Kongresi*, 21-23 Şubat, İstanbul, Türkiye.

Tumluer, G. (2006). Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti. *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Türer, E. (2014). Kohezyonsuz Zeminlerde Kesme Kutusu Deneyleri İle Kayma Mukavemeti Parametrelerinin Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Türker, P., Erdoğan, D., Katnaş, F., & Yeğinobalı, A. (2009). Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. TÇMB Ar-Ge Enstitüsü, Ankara.

TÜİK, Türkiye İstatistik Kurumu (2012). Termik Santral Su , Atıksu ve Atık İstatistikleri. <https://www.tuik.gov.tr/>

Uzuner, B.A. (2000). Temel Mühendisliğine Giriş. Derya Kitabevi, Trabzon.

Vassilev, S. V., & Vassileva, C. G. (2005). Methods for characterization of composition of fly ashes from coal-fired power stations: a critical overview. *Energy & Fuels*, 19(3), 1084-1098.

Wang, S. (2008). Application of solid ash based catalysts in heterogeneous catalysis. *Environmental science & technology*, 42(19), 7055-7063.

EKLER

- EK 1.** Standart Proktor deneyi sonucu (örnek)
- EK 2.** CBR sonuçları (örnek)
- EK 3.** Kesme kutusu deney sonuçları

EK 1 Standart Proktor deneyi sonucu (örnek)

Numune : Katkısız kum

Optimum su içeriği, w_{opt} : % 11,66Maksimum kuru birim hacim ağırlık, (γ_{kuru}) : 16,31 kN/m³

	1	2	3	4	5
kompaksiyon kalıbı(g)	3892.2	3892	3891.1	3892.3	3892
kalıp hacmi(cm ³)	943.69	943.69	943.69	943.69	943.69
Sıkıştırılmış zemin+kompaksiyon kalıbı(g)	5425.7	5490.1	5578.7	5643.7	5630.2
sıkıştırılmış zemin(g)	1533.5	1598.1	1687.6	1751.4	1738.2
nemli yoğunluk(g/cm ³)	1.63	1.69	1.79	1.86	1.84
nemli BHA(kN/m ³)	15.94	16.61	17.54	18.21	18.07
kuru BHA(kN/m ³)	15.49	15.75	16.17	16.31	15.38

Su İçeriği Deneyleri	1	2	3	4	5
su içeriği kabı(g)	44.1	46.6	54.4	44.1	55.3
yaş zemin+kap(g)	107	144.6	150.5	155.2	105.6
kuru zemin+kap(g)	105.2	139.5	143	143.6	98.1
kuru zemin(g)	61.1	92.9	88.6	99.5	42.8
su miktarı(g)	1.8	5.1	7.5	11.6	7.5
su içeriği(w)	0.02946	0.05489	0.08465	0.11658	0.17523
w(%)	2.95	5.49	8.47	11.66	17.52

EK 2 CBR sonuçları (örnek)

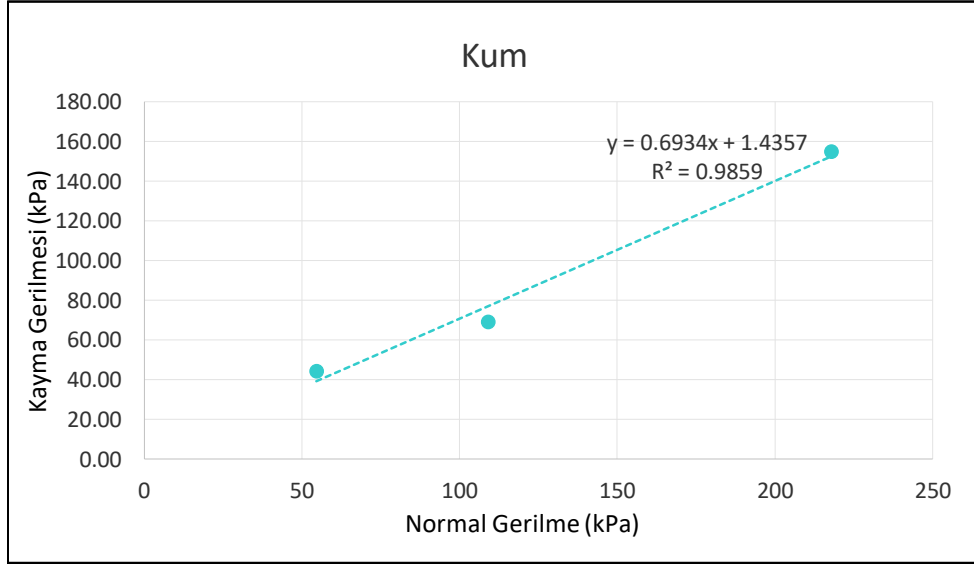
7 gün kür sonrası test edilen numunelerin kuru CBR sonuçları

$$CBR = \frac{\text{Düzeltilmiş basınç}}{\text{Standart basınç}} \times 100$$

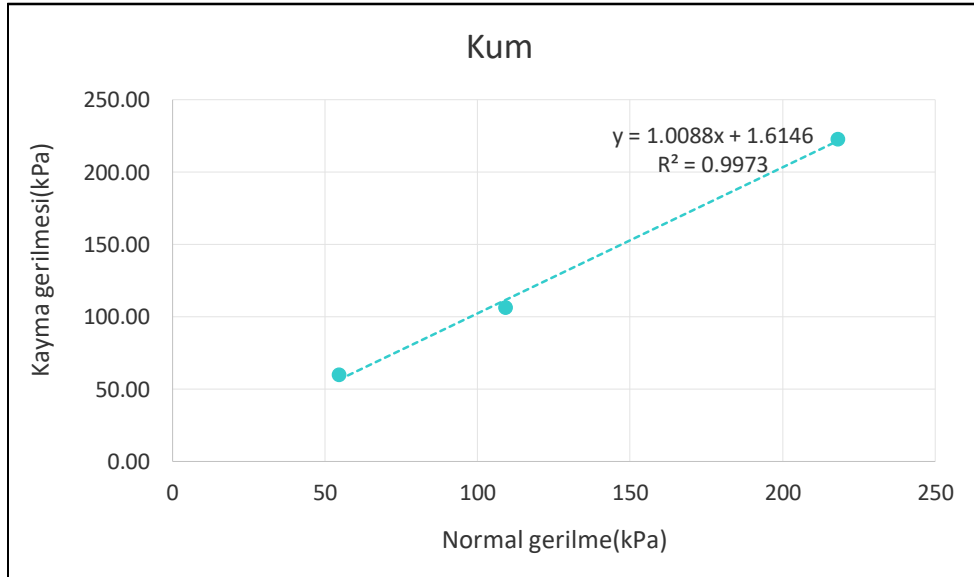
K			
penetrasyon(mm)	standart yük(N/mm2)	readings(N/mm2)	CBR (%)
2.5 mm	7	0.59	8.43
5 mm	10.5	1.95	18.57
K3Ç			
penetrasyon(mm)	standart yük(N/mm2)	readings(N/mm2)	CBR (%)
2.5 mm	7	4.89	69.86
5 mm	10.5	8.34	79.43
K3Ç5UK			
penetrasyon(mm)	standart yük(N/mm2)	readings(N/mm2)	CBR (%)
2.5 mm	7	6.65	95.00
5 mm	10.5	10.22	97.33
K3Ç10UK			
penetrasyon(mm)	standart yük(N/mm2)	readings(N/mm2)	CBR (%)
2.5 mm	7	6.91	98.71
5 mm	10.5	10.35	98.57
K3Ç15UK			
penetrasyon(mm)	standart yük(N/mm2)	readings(N/mm2)	CBR (%)
2.5 mm	7	7.1	101.43
5 mm	10.5	10.57	100.67
K3Ç20UK			
penetrasyon(mm)	standart yük(N/mm2)	readings(kg/cm2)	CBR (%)
2.5 mm	7	7.86	112.29
5 mm	10.5	10.84	103.24
K3Ç25UK			
penetrasyon(mm)	standart yük(N/mm2)	readings(kg/cm2)	CBR (%)
2.5 mm	7	9.06	129.43
5 mm	10.5	11.64	110.86

EK 3 Kesme kutusu deney sonuçları

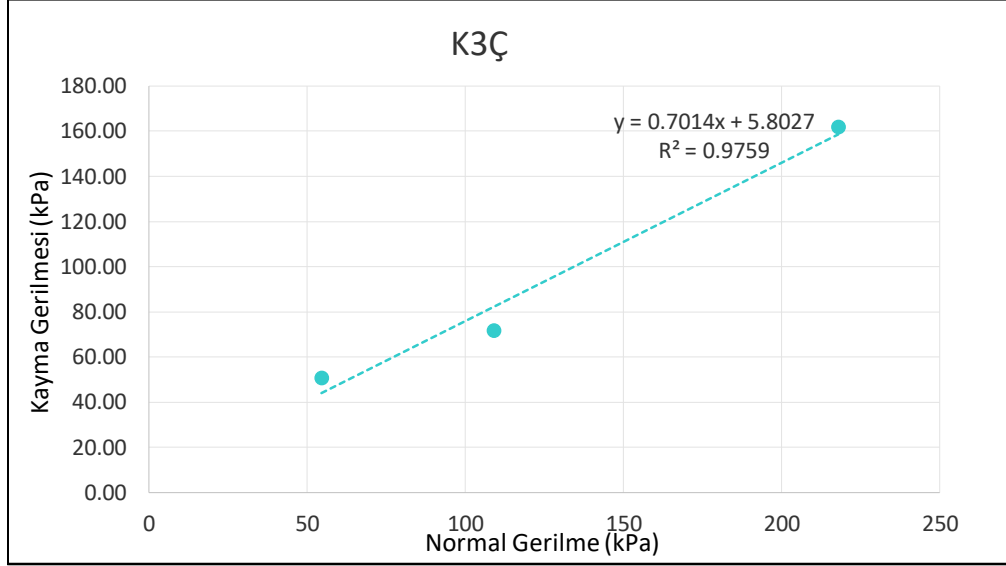
%30 rölatif sıkılık için;



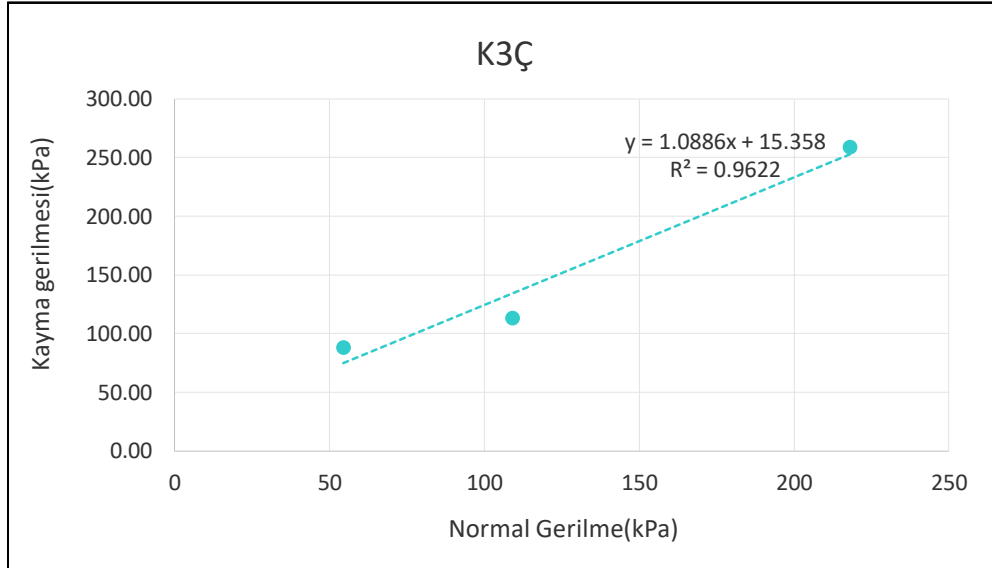
%80 rölatif sıkılık için;



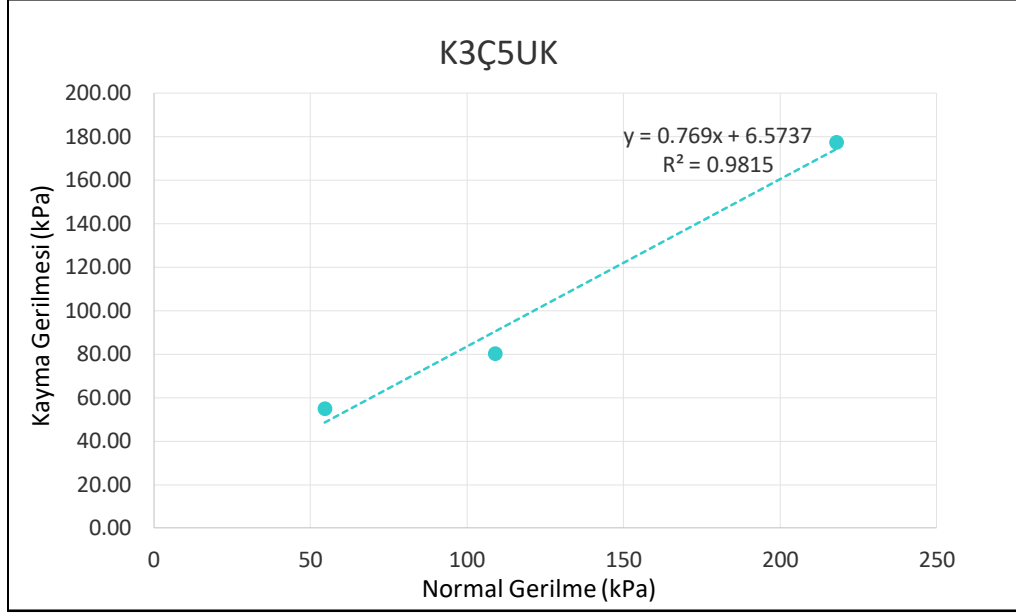
%30 rölâtif sıklık için;



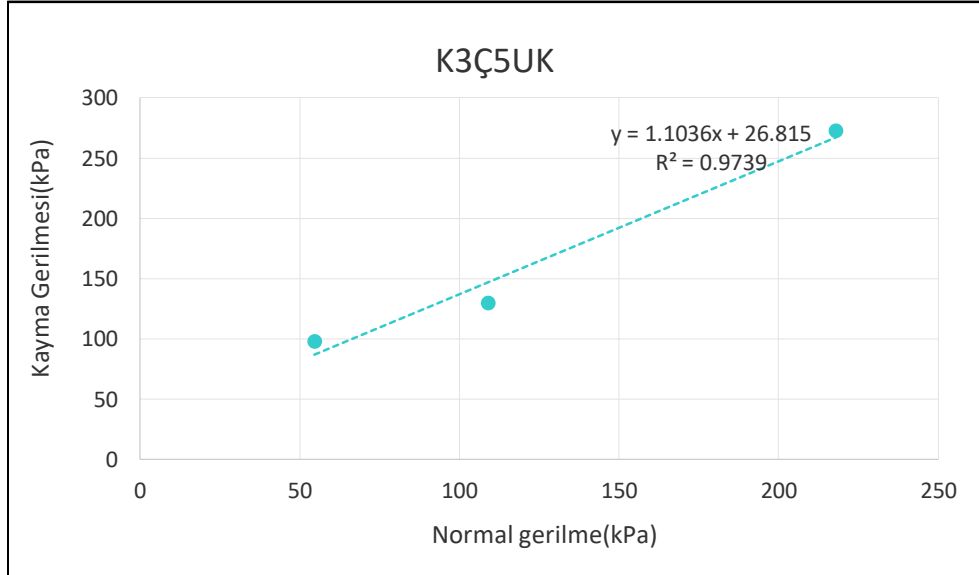
%80 rölâtif sıklık için;



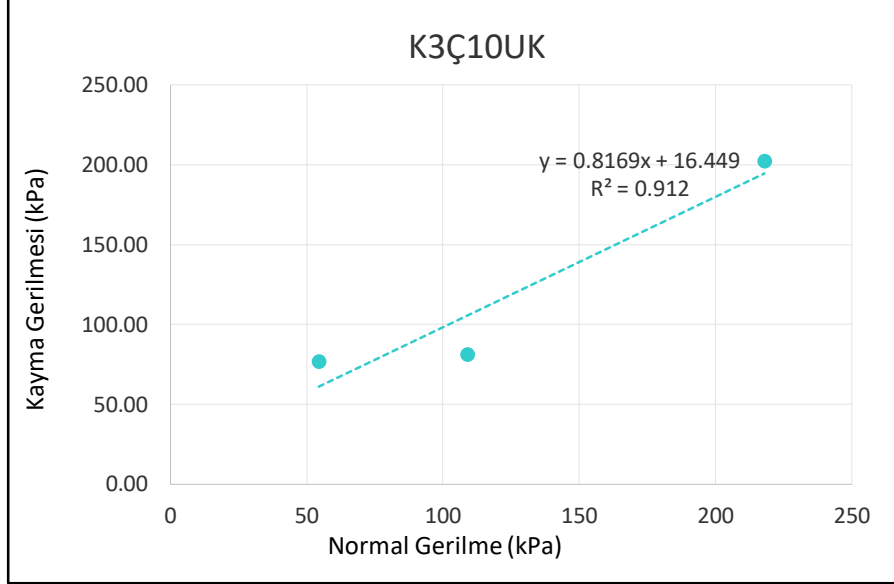
%30 rölâtif sıklık için;



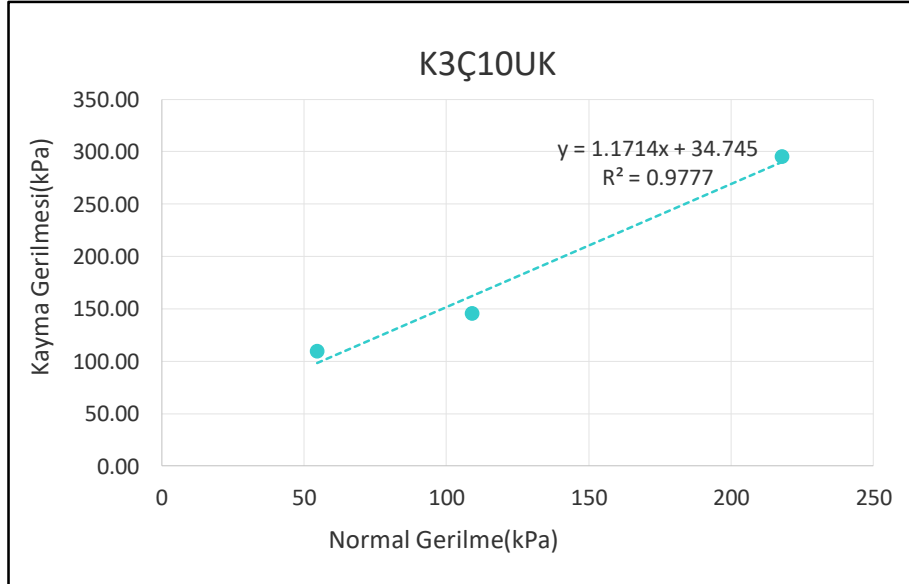
%80 rölâtif sıklık için;



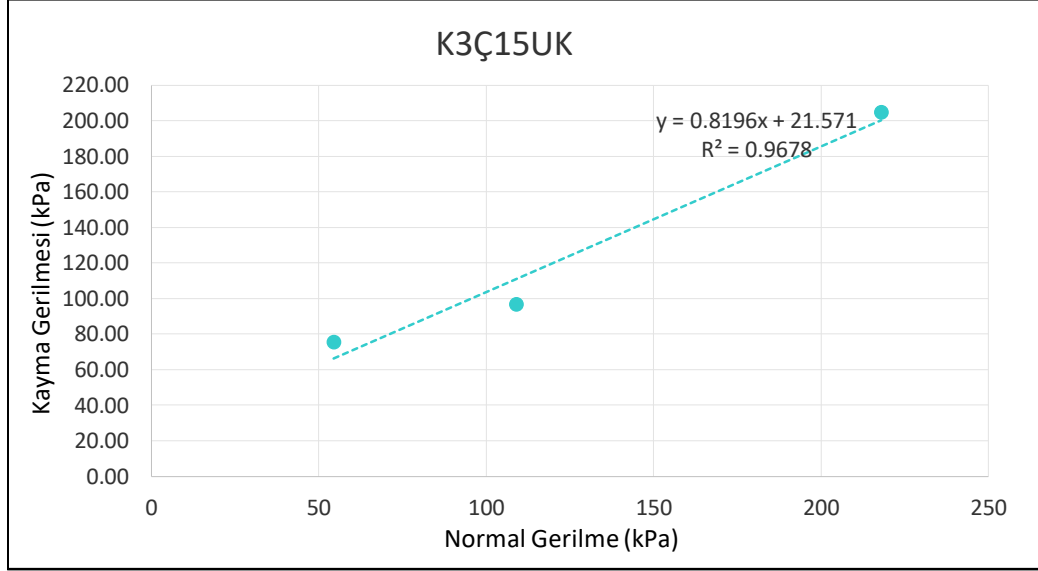
%30 rölaf sıklık için;



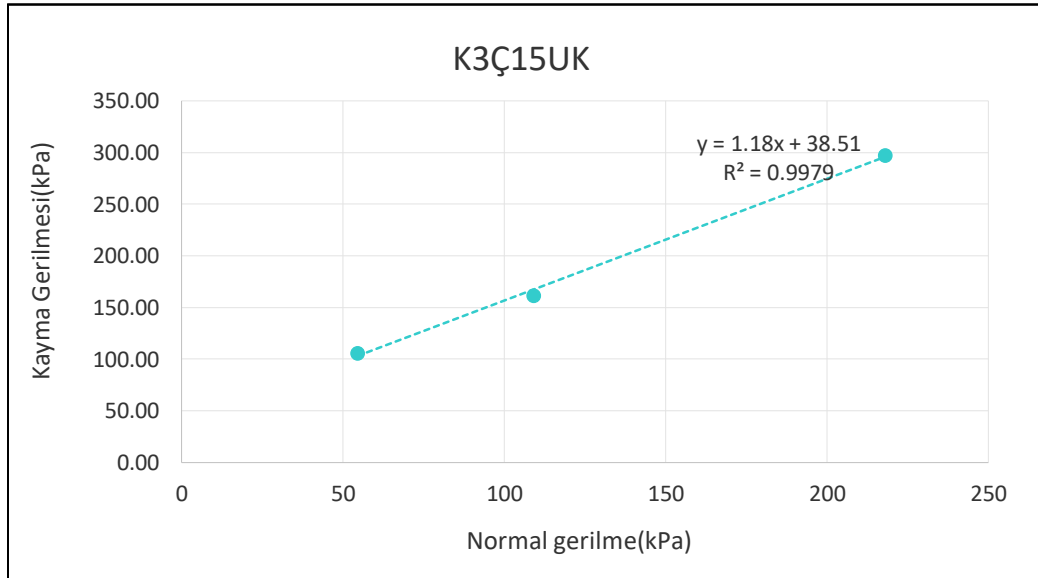
%80 rölaf sıklık için;



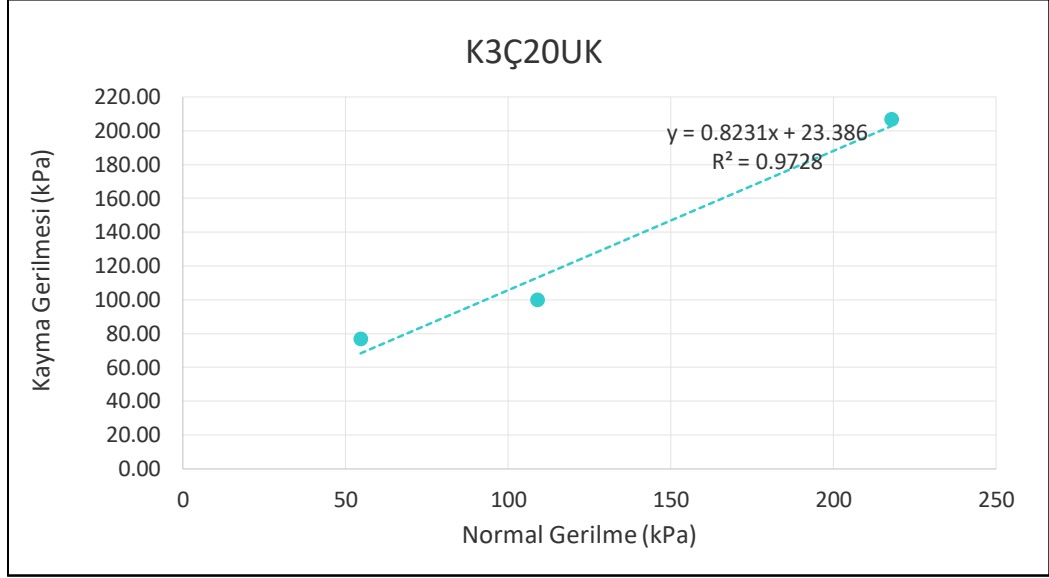
%30 rölatif sıklık iin;



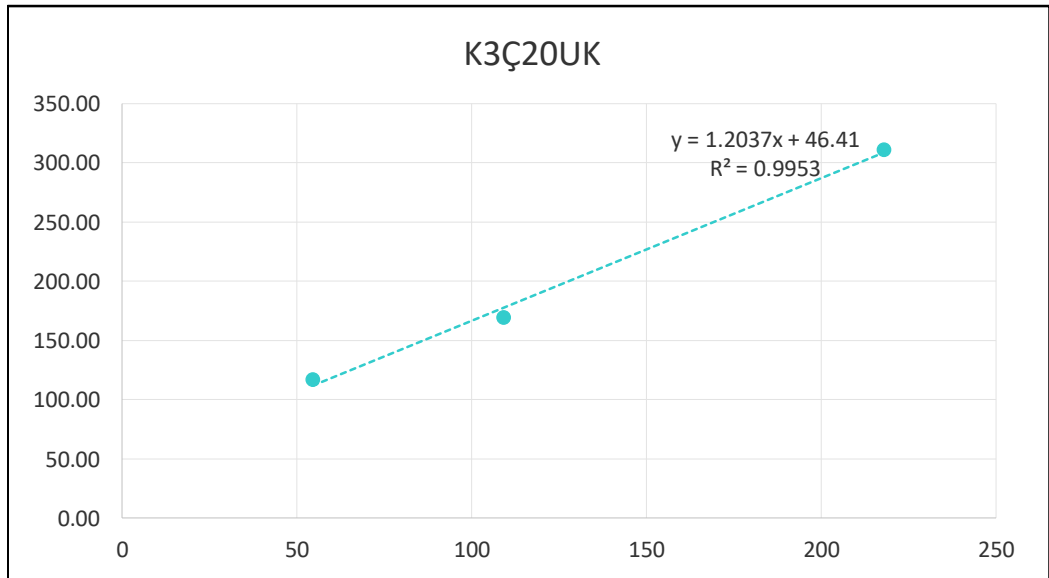
%80 rölatif sıklık iin;



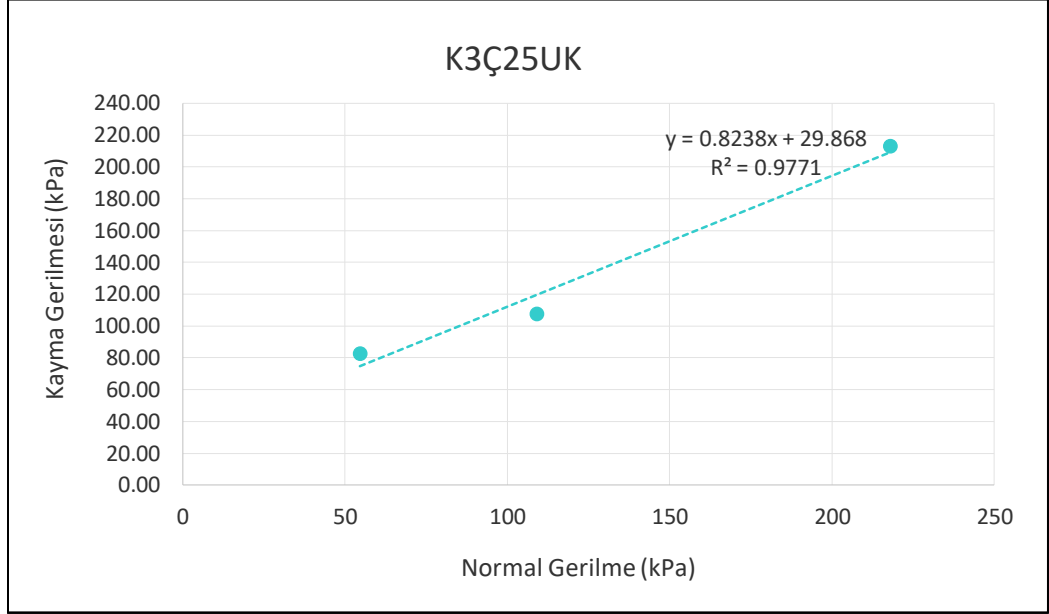
%30 rölatif sıklık için;



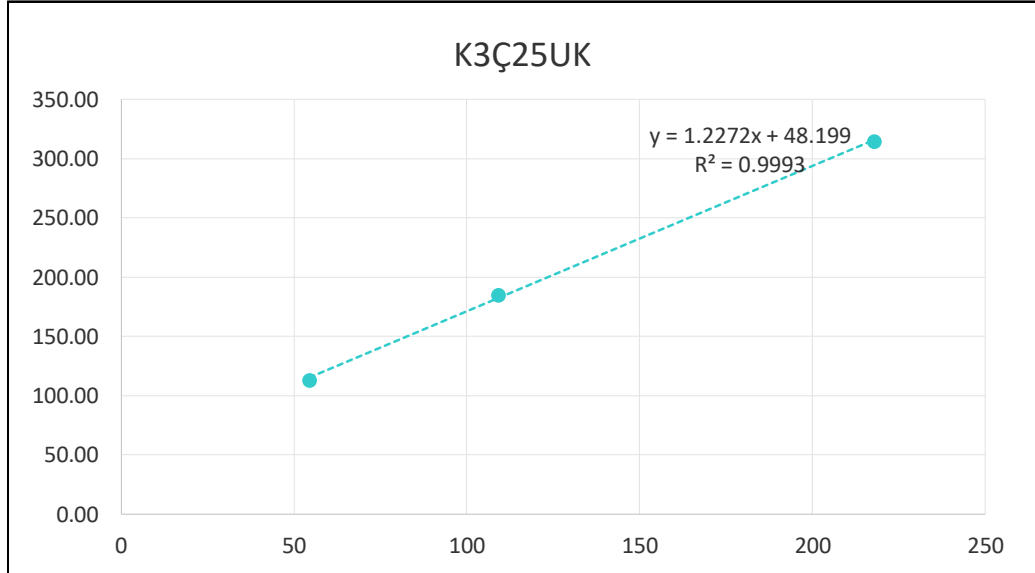
%80 rölatif sıklık için;



%30 rölatif sıklık için;



%80 rölatif sıklık için;



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Elanur YAZICI
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa/1996
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Nuri Nihat Aslanoba Anadolu Lisesi
Lisans : Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi

Çalıştığı Kurum(lar) :

İletişim (e-posta) : elanuryzc16@gmail.com

Yayımları :