



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KUTLUBEY-YAZICILAR BÖLGESİ KİLLERİNİN FİZİKSEL ve
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ÇATALAĞZI UÇUCU KÜLÜ İLE
STABİLİZASYONU**

HAZIRLAYAN

FATİH ACAR

DANIŞMAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ FATİH GÖKTEPE

BARTIN-2019



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KUTLUBEY-YAZICILAR BÖLGESİ KİLLERİNİN FİZİKSEL ve MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ÇATALAĞZI UÇUCU KÜLÜ İLE STABİLİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN

Fatih ACAR

JÜRİ ÜYELERİ

- Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Fatih GÖKTEPE - Bartın Üniversitesi
Üye : Doç. Dr. Altan ÇETİN - Bartın Üniversitesi
Üye : Dr. Öğr. Üyesi A. Bengü SÜNBÜL - Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

BARTIN-2019

KABUL VE ONAY

Fatih ACAR tarafından hazırlanan “KUTLUBEY-YAZICILAR BÖLGESİ KİLLERİNİN FİZİKSEL ve MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ÇATALAĞZI UÇUCU KÜLÜ İLE STABİLİZASYONU” başlıklı bu çalışma, 12.07.2019 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Altan ÇETİN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih GÖKTEPE (Danışman)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL

Bu tezin kabulü Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun 12/07/2019 tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. H. Selma ÇELİKAY
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Dr. Öğr. Üyesi Fatih GÖKTEPE danışmanlığında hazırlamış olduğum “KUTLUBEY-YAZICILAR BÖLGESİ KİLLERİNİN FİZİKSEL ve MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ÇATALAĞZI UÇUCU KÜLÜ İLE STABİLİZASYONU” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

12.07.2019

Fatih ACAR



ÖNSÖZ

Yüksek lisans döneminde her türlü konuda beni yalnız bırakmayarak danışmanlığımı üstlenen, araştırma konusunun seçiminden sonuçlandırılmasına kadar katkı ve emeklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Fatih GÖKTEPE'ye saygıyla ve içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Bilimsel anlamda bilgi, görüş ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Ermedin TOTİÇ'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasını 2018-FEN-CY-011 proje numarasıyla maddi olarak destekleyen Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

Hayatımın her safhasında olduğu gibi tez çalışmam süresince de verdikleri moral ve destek ile beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan başta annem, babam, eşim olmak üzere tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

Fatih ACAR
Bartın, 2019

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KUTLUBEY-YAZICILAR BÖLGESİ KİLLERİNİN FİZİKSEL ve MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ÇATALAĞZI UÇUCU KÜLÜ İLE STABİLİZASYONU

Fatih ACAR

Bartın Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Fatih GÖKTEPE

Bartın-2019, sayfa: 87

Zeminlerin emniyet gerilmesi açısından güvenli olması başta dere ıslahı, boru hatları, kanalizasyon hatları gibi altyapı çalışmaları ile yol inşaatı veya yapıların konumlandırıldığı temellerin altındaki zeminler için önemlidir. Killi zeminlerin mekanik özelliklerindeki yetersizlikler inşaat mühendisliği uygulamalarında taşıma kapasitesi yetersizliği, şişme ve büzülme eğilimi, kayma mukavemetindeki yetersizlik, konsolidasyon ve stabilite problemlerine neden olabilmektedir. Yapılan bu çalışma, yüksek plastisiteli killi zeminlerin termik santral atığı uçucu küller ile karıştırılıp, sıkıştırılarak mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine odaklanmıştır. Bu amaçla, Çatalağzı Termik Santralinden temin edilen atık uçucu kül ile Bartın ili Kutlubey bölgesine ait killi zemin örnekleri kullanılmıştır. Optimum su muhtevalarında sıkıştırılan uçucu kül-kil karışımları 1, 8, 16 ve 32 gün kürde bekletildikten sonra üç eksenli basınç deneyi için numuneler hazırlanmıştır. Kür süreleri tamamlanan numuneler üç eksenli deney aletinde konsolidasyonsuz ve drenajsız deney koşullarında (UU) test edilmiştir. Çalışmanın deneysel kısmının son aşamasında ise uçucu kül-kil karışımlarının mühendislik davranışının daha iyi belirlenebilmesi amacıyla Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ve X-Işını Kırınım (XRD) analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, killi zeminlere ağırlıkça %5 ila %20 arasında değişik oranlarda uçucu kül katılarak elde edilen karışımların mukavemet değerlerinde önemli oranda artışlar gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, belli oranlardan sonra killi zeminlere yapılan uçucu kül

katkısının kayma mukavemetini önemli ölçüde etkilemediği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Üç eksenli basınç dayanımı; deneysel çalışma; zemin stabilizasyonu; uçucu kül-kil karışımları; killi zeminlerin mekanik özellikleri.

Bilim Kodu: 911.1.050



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

STABILIZATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF KUTLUBEY –YAZICILAR CLAYS WITH ÇATALAĞZI FLY ASH

Fatih ACAR

Bartın University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Fatih GÖKTEPE

Bartın-2019, pp: 87

The safety of soils in terms of safety stress is especially important for infrastructure works such as stream improvement, pipelines, sewer line or for the soils under the bases where the structures are located. Mechanical properties of clayey soils can cause problems due to mechanical insufficiencies in clayey soils such as bearing capacity failure, swelling and shrinkage tendency, shear strength failure, consolidation and stability problems. This study focused on the improvement of mechanical properties of a high plasticity clayey soils mixed with fly ashes of thermal power plant waste. For this purpose, the fly ash obtained from Çatalağzı Thermal Power Plants and the clayey soils belonging to Kutlubey region of Bartın were used. These fly ash-clay mixtures, which are compacted in optimum water contents, were stored in the cure (1-8-16-32 days) for the triaxial pressure test. The samples completed for curing time were tested without consolidation and drainage (UU) conditions by using the triaxial test machine. In order to better determine the engineering behavior of fly ash-clay mixtures, the Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray Powder Diffraction (XRD) analyses were performed at the final stage of the experimental part of the study. From the tests results, significant increases were observed in the strength values of mixtures which were formed the fly ash percentages added between 5% and 20% to clayey soils. However, it was determined that the addition of fly ash to clayey soils more than a certain percentage

of additives did not significantly affect shear strength.

Keywords: Triaxial compressive strength; experimental study; soil stabilization; fly ash-clay mixtures; the mechanical properties of clayey soils.

Science Code: 911.1.050



İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	iii
BEYANNAME.....	iv
ÖNSÖZ	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	viii
İÇİNDEKİLER.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xv
EKLER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xviii
SİMGELER.....	xviii
KISALTMALAR	xxi
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ	1
1.1 Problemin Tanımlanması	1
1.2 Konu ile İlgili Çalışmalar.....	3
1.3 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı	15
BÖLÜM 2.....	17
ZEMİNLERDE KAYMA MUKAVEMETİ VE KIRILMA HİPOTEZLERİ	17
2.1 Zeminlerde Kayma Direnci.....	17
2.1.1 Zeminlerde Gerilme-Gerinim Eğrisi	18
2.1.2 Kırılma Yenilme Kriteri	19
2.2 Zeminlerde Kırılma Hipotezleri	21
2.2.1 Lineer Elastik Model.....	21
2.2.2 Mohr Coulomb Model.....	22
2.3 Killerin Kayma Direnci	24
2.3.1 Normal Konsolide Killerin Kayma Direnci.....	24
2.3.2 Aşırı Konsolide Killerin Kayma Direnci.....	27
2.4 Killi Zeminlerde Kayma Direncinin Belirlenmesi	33
2.4.1 Basit Kesme Deneyi	33
2.4.2 Serbest Basınç Deneyi.....	34
2.4.3 Üç Eksenli Basınç Deneyi	35

BÖLÜM 3.....	38
MATERYAL VE YÖNTEM	38
3.1 Kutlubey Yazıcılar Bölgesi Killeri	39
3.2 Çatalağzı Termik Santrali Uçucu Külleri	39
3.2.1 Çatalağzı Termik Santrali Uçucu Küllerinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	40
3.2.2 Çatalağzı Termik Santrali Uçucu Küllerinin Sınıflandırılması	41
3.2.2 Çatalağzı Termik Santrali Uçucu Küllerinin Kullanıldığı Alanlar	42
3.3 Deneysel Çalışma Sonuçları	43
3.3.1 Dane Boyutu Dağılımlarının Belirlenmesi	43
3.3.2 Özgül Ağırlık Deney Sonuçları	45
3.3.3 Kıvam Limitleri Deney Sonuçları.....	46
3.3.4 Standart Proktor Deney Sonuçları.....	49
3.3.5 Üç Eksenli Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Kür Koşulları	50
3.3.6. Üç Eksenli Deney Cihazının Tanıtımı ve Deney Aşamaları	54
BÖLÜM 4.....	62
BULGULAR VE TARTIŞMA.....	62
4.1. Üç Eksenli Deney (UU) Sonuçları	62
4.3. X ışını kırınımı (XRD) analiz sonuçları	68
4.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçları.....	72
BÖLÜM 5.....	78
SONUÇ VE ÖNERİLER	78
KAYNAKLAR.....	80
EKLER	83
ÖZGEÇMİŞ.....	87

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
No	No
Şekil 1.1: Çeşitli termik santrallerden alınan uçucu küllerin X-Işınları difraktogramları (Tokyay, 1989).	4
Şekil 1.2: Uçucu kül içeriği ile serbest basınç dayanımı değişimi (a: Soma, b: Yatağan) (İnan vd., 2005).....	9
Şekil 1.3: Kür süresi ile serbest basınç dayanımı değişimi (a: Soma, b: Yatağan) (İnan vd., 2005).	9
Şekil 1.4: Ankara Çukurambar killi zemin numunesi ve Çayırhan Termik Santrali uçucu külüne ait dane boyutu dağılım eğrileri (Yılmaz ve Sevincan, 2010).....	12
Şekil 2.1: Doruk değer göstermeyen bir zemin numunesine ait örnek grafik.	20
Şekil 2.2: Doruk değer küçük birim deformasyon değerlerinde görülmesi durumuna ait örnek grafik.	20
Şekil 2.3: Maksimum deviator gerilmeye ulaşmadan gerilme oranının pik yaptığı duruma ait örnek grafik.....	20
Şekil 2.4: Kalıntı dirence ait örnek grafik.....	21
Şekil 2.5: Mohr gerilme daireleri ve kırılma zarfı (Genç, 2011).	23
Şekil 2.6: Yumuşak killere ait CU deney sonucu (Das, 2007).	26
Şekil 2.7: Aşırı konsolide kil zeminde kırılma zarfına ait tipik ilişkiler (Das, 1983).	28
Şekil 2.8: Aşırı konsolidasyon oranı ile β ilişkisi (Das, 2007).	29
Şekil 2.9: Aşırı konsolide kilde CU deney koşuluna ait kırılma zarfı (Önalp, 2002).	30
Şekil 2.10: Aşırı konsolide kilde CD deney koşuluna ait teorik ve gerçek kırılma zarfı. ...	31
Şekil 2.11: Aşırı konsolide kilde doruk, son ve kalıcı direnç (Genç, 2011).	32
Şekil 2.12: a. Basit kesme deney aleti görünüm, b. deney aletine ait şematik çizim.	34
Şekil 2.13: Tek eksenli deney aleti.	35
Şekil 2.14: Üç eksenli deney aleti.	36
Şekil 3.1: Çalışma alanı yer bulduru haritaları ve çalışma alanında yer alan kil taşı birimlerinden görünüm.....	39
Şekil 3.2: a. Çatalağzı termik santrali uçucu külüne ait resim b. Çatalağzı uçucu külüne ait dane boyutu dağılımı grafiği (Göktepe vd., 2018).....	40
Şekil 3.3: Islak elek analizi deneyine ait fotoğraf.	44

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.4: Hidrometre deneyine ait fotoğraf.	44
Şekil 3.5: Dane boyutu dağılımı sonuçları (Göktepe vd., 2018).	45
Şekil 3.6: Piknometre deney görüntüleri	45
Şekil 3.7: Piknometre deney sonuçları	46
Şekil 3.8: İnce daneli zeminler için verilen plastisite kartı (TS 1500, 2000).	47
Şekil 3.9: Plastisite kartında yaygın kil minerallerinin lokasyonları (Casagrande, 1932; geliştirilmiş veriler Mitchell; 1976).	48
Şekil 3.10: Numunelerin plastisite kartı üzerindeki yerleri.	48
Şekil 3.11: Standart proktor deney görüntüleri.	49
Şekil 3.12: Standart proktor deney eğrileri (Göktepe vd., 2018).	50
Şekil 3.13: Standart enerjiyle sıkıştırılan kalıplar.	51
Şekil 3.14: Numune alıcıların kalıba batırılması.	52
Şekil 3.15: Numunelerin kür işlemi için hazırlanması.	53
Şekil 3.16: Numunelerin kür sürelerini beklemek üzere saklanması	54
Şekil 3.17: Tam otomatik üç eksenli basınç deneyi makinası yazılımına proje bilgilerinin girilmesi.	54
Şekil 3.18: Numunelerin çap, boy ve ağırlıklarının ölçülmesi.	57
Şekil 3.19: Tam otomatik üç eksenli basınç deneyi makinası yazılımına numune bilgilerinin girilmesi.	57
Şekil 3.20: Deney hücresine numunenin yerleştirilmesi.	59
Şekil 3.21: Test parametreleri sekmesinden bir görünüm.	60
Şekil 3.22: Okuma tablosu sekmesinden bir görünüm.	60
Şekil 3.23: Doyurma sekmesinden bir görünüm.	61
Şekil 3.24: Konsolidasyon b tablosu sekmesinden bir görünüm.	61
Şekil 3.25: Kesme tablosu sekmesinden bir görünüm.	62
Şekil 3.26: Pompa vanalarının aktif hale getirilmesi.	62
Şekil 3.27: Pompa basınç kontrol işleminin yapılması.	63
Şekil 4.1: Numunenin tam otomatik deney aletinde üç eksenli deneye tabi tutulması.	64
Şekil 4.2: Numunede gözlenen kayma düzlemleri.	65
Şekil 4.3: Kohezyon değerlerinde gözlenen değişimler.	67
Şekil 4.4: Kayma direnci açısından gözlenen değişimler	68
Şekil 4.5: 32 gün kürde bekletilmiş karışımların Eksenel gerilme – Şekil değiştirme eğr.	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 4.6: Yalın numuneler ve karışımlara yapılan XRD sonuçları.	72
Şekil 4.7: Kil zemine ait SEM görüntüsü.	74
Şekil 4.8: Kil zemine ait SEM görüntüsü.	74
Şekil 4.9: Çatalağzı Termik Santrali uçucu külüne ait SEM görüntüsü.	75
Şekil 4.10: Çatalağzı Termik Santrali uçucu külüne ait SEM görüntüsü.	76
Şekil 4.11: Karışıma ait SEM görüntüsü..	77
Şekil 4.12: Karışıma ait SEM görüntüsü..	77
Şekil 4.13: Karışıma ait SEM görüntüsü..	78
Şekil 4.14: Karışıma ait SEM görüntüsü..	78



TABLolar DİZİNİ

Tablo No	Sayfa No
Tablo 1.1: Çeşitli termik santrallerden alınan uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları (Tokyay, 1989).	5
Tablo 1.2: Çeşitli termik santrallerden alınan uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları (Tokyay, 1989).	6
Tablo 1.3: Karışım oranı ve kür süresinin kıvam limitlerine etkisi (İmançlı, 2002).	7
Tablo 1.4: Doğal zemin, uçucu kül ve katkılı zeminlerin γ_{kmak} ve W_{opt} değerleri (İmançlı, 2002).	7
Tablo 1.5: Katkı oranı ve kür süresine göre serbest basınç deneyi mukavemet değerleri (kN/m ²) (İmançlı, 2002).	7
Tablo 1.6: Doğal zemin ve uçucu kül katkılı zeminlerin γ_{kmak} ve W_{opt} değerleri (İnan vd., 2005).	8
Tablo 1.7: Deneyde kullanılan killi zemine ait bazı özellikler (Aksoy vd., 2008).	10
Tablo 1.8: Deney numunelerinin Atterberg limitleri ve standart proktor deneyi sonuçları (Aksoy vd., 2008)	10
Tablo 1.9: UU sonuçlarına göre kayma mukavemeti parametreleri (Aytekin, 2009).	11
Tablo 1.10: Karışımların serbest basınç deneyi sonuçları (Yılmaz ve Sevensan, 2010). ...	12
Tablo 1.11: Yalın numune ve uçucu kül ile hazırlanmış standart proktor ve serbest basınç deneyi sonuçları (Çetin, 2011).	13
Tablo 1.12: Yalın numune ve uçucu kül ile hazırlanmış numunelerin laboratuvar deney sonuçları (Ünver, 2015).	13
Tablo 1.13: Yalın numune ve uçucu kül ile hazırlanmış numunelerin Atterberg kıvam limitleri deney sonuçları (Yılmaz, 2016).	14
Tablo 1.14: Yalın numune ve uçucu kül ile hazırlanmış numunelerin standart proktor deney sonuçları (Yılmaz, 2016).	14
Tablo 1.15: Yalın numune ve uçucu kül ile hazırlanmış numunelerin serbest basınç deneyi sonuçları (Yılmaz, 2016).	15
Tablo 3.1: Uygulanan deneyler ve uygulandıkları kür süreleri.	38
Tablo 3.2: Çatalağzı termik santraline ait kimyasal analiz sonuçları (Türker vd., 2009). ...	41

TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.3: Çatalağzı uçucu külünün kimyasal içeriği ve standart sınırları (Türker vd., 2009).	42
Tablo 4.1: Kür Süresine ve uçucu kül yüzdesine göre farklı çevre basınçları altındaki kayma mukavemeti değerleri.....	64
Tablo 4.2: Kür Süresine ve uçucu kül yüzdesine göre farklı çevre basınçları altındaki kırılma yüzdeleri.	64
Tablo 4.3: Çatalağzı Termik Santrali'ne ait uçucu külün mineralojik kompozisyonu (Aruntaş, 2006).	69
Tablo 4.4: Silikat ve alüminat bileşenler.....	69
Tablo 4.5: Bazı kil minerallerine ait özellikler (Önalp, 1983).	72

EKLER DİZİNİ

Ek	Sayfa
<u>No</u>	<u>No</u>
EK 1. Çeşitli deneylere ait sonuç tabloları.....	83
EK 2. EK 2: Üç eksenli deney aleti programı deney sonuçları örneği (16 gün kür süresi, 50 kPa-150 kPa-400 kPa çevre basınçları).....	84



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

$^{\circ}\text{C}$	: santigrat derece
Ag	: gümüş
Al_2O_3	: alüminyum oksit
As	: arsenik
Be	: berilyum
c	: kohezyon
c'	: efektif kohezyon
CaO	: kalsiyum oksit
c_{cd}	: konsolidasyonlu drenajlı deneyden elde edilen içsel sürtünme açısı
Cd	: kadmiyum
Cl	: klor
cm^2	: santimetrekare
cm^3	: santimetreküp
Cr	: krom
c_r'	: efektif kalıntı direnç durumundaki kohezyon
CSH	: kalsiyum silikat hidrat
Cu	: bakır
c_u	: drenajsız durumdaki kohezyon
ε	: birim şekil değiştirme
E	: elastisite modülü
ϕ	: içsel sürtünme açısı
ϕ'	: efektif içsel sürtünme açısı
ϕ_{cu}	: konsolidasyonsuz drenajsız deneyden elde edilen içsel sürtünme açısı
ϕ_d'	: konsolidasyonsuz drenajlı deneyden elde edilen içsel sürtünme açısı
Fe_2O_3	: ferrik oksit
ϕ_r'	: efektif kalıntı direnç durumundaki içsel sürtünme açısı
g	: gram
γ_{kmak}	: maksimum kuru birim hacim ağırlık
γ_n	: doğal birim hacim ağırlık
Hg	: civa

I_B	: gevreklik indisi
I_P	: plastisite indisi
K_2O	: potasyum oksit
kN	: kiloNewton
kPa	: kiloPascal
μ	: sürtünme katsayısı
m^2	: metrekare
m^3	: metreküp
MgO	: magnezyum oksit
μm	: mikrometre
mm	: milimetre
MW	: MegaWatt
Na_2O	: sodyum oksit
Ni	: nikel
Pb	: kurşun
q_u	: serbest basınç mukavemeti
σ	: normal gerilme
σ'	: efektif normal gerilme
σ_1	: üç eksenli deneyde uygulanan büyük asal gerilme
σ_1'	: üç eksenli deneyde uygulanan efektif büyük asal gerilme
σ_3	: üç eksenli deneyde küçük asal gerilme
σ_3'	: üç eksenli deneyde uygulanan efektif küçük asal gerilme
Sb	: antimon
σ_c	: toplam gerilmeler türünden aşırı konsolidasyon basıncı
σ_c'	: efektif gerilmeler türünden aşırı konsolidasyon basıncı
Se	: selenyum
SiO_2	: silika
σ_o'	: efektif gerilme cinsinden zemin örtü yükü
SO_3	: kükürt trioksit
S_u	: drenajsız kayma direnci
τ_{cr}	: kritik kayma direnci
τ_f veya s	: toplam gerilme türünden kayma direnci
Ti	: titanyum

τ_p	: maksimum kayma direnci
τ_r	: kalıcı direnç
u	: boşluk suyu basıncı
w	: su muhtevası
w_L	: likit limit
w_{opt}	: optimum su muhtevası
w_p	: plastik limit
Zn	: çinko



KISALTMALAR

ASTM D2850 - 15	: Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils
ASTM C618	: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete
ASTM D2487	: Standard Classification of Soils for Engineering Purposes
CD	: Konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi
CH	: Yüksek plastisiteli kil
CL	: Düşük plastisiteli kil
CU	: konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç deneyi
ÇUK	: Çatalağzı Termik Santrali uçucu külü
OC	: Aşırı konsolidasyon
OCR	: Aşırı Konsolidasyon Oranı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SUK	: Soma Termik Santrali uçucu külü
TS 1500	: İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması
TS 1900	: İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri
TS 639	: Uçucu küller-Çimentoda kullanılan
TS EN 197-1	: Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri
TS EN 450	: Uçucu Kül – Betonda kullanılan
USCS	: Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi
UU	: konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç deneyi
XRD	: X ışını kırınımı deneyi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Problemin Tanımlanması

Yeryüzü katı, sıvı, gaz fazlarının çeşitli oranlarda birleşmesiyle oluşmuş zemin adını verdiğimiz doğal bir katmanla kaplıdır. Geoteknik disiplini, jeolojik zemin birimlerini zemin mekaniği ve kaya mekaniği gibi iki ana başlık altında incelemektedir. Kayaçların zaman içerisinde ayrışma, bozunma, çökme gibi fiziksel ve kimyasal etkiler altında kalarak çakıl, kum, silt, kil gibi malzemelere dönüşmesi ile zemin mekaniği biliminin araştırma konuları şekillenmiştir. Zemin mekaniğinde büzülme/kabarma potansiyeli yüksek, taşıma kapasitesi düşük, su içerisinde dağılma özelliği taşıyan dispersif killer gibi sorunlu kil zeminler, zemin mekaniği disiplininin ortaya atıldığı zamandan bu yana araştırma konuları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir istinat duvarının geri dolgusunda kullanılan kil zemin, geçirimsiz olması halinde drenaj problemlerine sebep olabilir. Çelik, ahşap, beton veya prefabrik malzemeden inşa edilmiş tek katlı yapının şişme potansiyeli yüksek kil zemin üzerine inşa edilmesi durumunda, zemin önemli hacim değişiklikleri yaparak üstyapının hasar görmesine neden olabilir. Yüksek katlı yapıların, oturma potansiyeli yüksek zemin üzerine inşası, yer altında bulunan kanalizasyon hatlarının sızdırmasına ve hatta kopmasına neden olabilir. Meydana gelen oturma problemlerine killi zeminler üzerine inşa edilen beton kilit parke taş kaplamalı yollar örnek verilebilir. Trafik yükleri gibi tekrarlı dinamik yük kaynaklarının yoğunlaşabilir kıvamdaki killi zeminlere etkimesi sonucu çökmeler gerçekleşir ve kaplama sathı bozulur. Genelde zeminden kaynaklanan problemler doğal afetler gibi bir anda gerçekleşmezler. Fakat zaman içerisinde çok büyük ekonomik yıkımlara sebep olurlar. Amerika'da yapılan bir araştırmada şişen zeminlerin inşaat tesislerine verdikleri yıllık zararın 9 milyar dolar civarında olduğu tespit edilmiştir (Jones ve Holtz, 1973).

Yapıların konumlandırılacağı zemin tabakaları geoteknik olarak değerlendirilerek, sorun teşkil edebilecek zemin katmanları inşa edilecek yapının da tasarım şartları dikkate alınarak iyileştirmeye tabi tutulur. Farklı tasarım grupları, farklı zemin iyileştirme yöntemleri gerektirir. Taşıma gücü zayıf zemin ortamlarında oluşabilecek yenilme sorunlarının çeşitliliği stabilizasyon yöntemlerinin artmasına sebep olmuştur. Çevresel sorunlara sebep

olan termik santral atığı uçucu küllerin zeminlerin kimyasal yolla stabilizasyonunda kullanılması ile zeminin taşıma kapasitesinin iyileştirilmesi ve oluşabilecek konsolidasyon oturmaları sınırlandırılabilir. Ancak, stabilizasyonda görevli mühendisin ekonomi, çevresel etki değerlendirmesi, zeminin mukavemet artışları, zeminin şişme ve büzülmesindeki sınırlama miktarı gibi değişimleri dikkatlice inceleyip yorumlaması şarttır.

Türkiye 8,23 milyar ton linyit kömürü rezervi ile Avrupa ülkeleri arasında 5. sırada yer almaktadır (Arioğlu ve Ökten, 1989). 2006 yılında yapılan bir çalışmada ülke kapsamında 15 termik santralin 9845 MW kurulu güç için 55 milyon ton/yıl linyit kömürü tükettikleri, bunun sonucunda bacalardan 1993 yılı verilerine göre 13,5 milyon ton/yıl, 1998 yılı verilerine göre ise yaklaşık 13 milyon ton/yıl uçucu kül atık elde edildiği belirtilmiştir (Aruntaş, 2006). TÜİK 2017 yılı verilerine göre faaliyet gösteren 61 adet termik santralden 19,5 milyon ton/yıl atık elde edilmiş ve bu atıkların %16,7 si atık bertaraf/geri kazanım tesislerine ve maden/taş ocaklarına gönderilmiştir. Yılda 16 milyon tonu aşkın uçucu kül atığının geri dönüşümde kullanılmak üzere biriktiği söylenebilir. Azami 28 ton yük taşıyan bir kamyonun günlük oluşan atığın nakliyesi için 1588 sefer yapması gerekmektedir.

Doğal zemin ortamı çeşitli derecelerde kirlilik oluşturan maddeler için doğal bir filtredir, uçucu küllerin bünyesinde Sb, As, Be, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Se, Ag, Zn vb. elementler bulunmaktadır. Bu elementlerin her biri canlılar üzerinde çeşitli toksik etkiler meydana getirmektedir. Depo edilen uçucu küllerin asidik su akıntısı kükürtlü demirlerin (pirit ve markazit) oksitlenip daha sonra suda çözünmesiyle oluşur, eğer tedbir alınmazsa yeraltı ve yerüstü sularına karışırlar (Türkmenoğlu, 2010). Depo edilen atık malzemeler hava kirliliğine de neden olup, soluma yoluyla canlılar üzerinde toksik etkiler oluştururlar. Termik santral atığı uçucu küllerin hava, su ve toprak kirliliğine neden olan etkilerini azaltmak için atığın kullanım alanlarını arttırmalıyız fakat fazlaca toprağa karışmasının da önüne geçmeliyiz.

Tez kapsamında yapılan bu çalışma ile zemin dayanımlarının en yüksek değerleri verdiği optimum oranda uçucu kül-zemin karışım oranları belirlenmiştir. Böylelikle atığın zemini kirliletmeyecek oranda zemine dahil edilmesiyle hem zemin dayanımları arttırılmış hem de atığın ekolojik çevrimi sağlanmış olacaktır.

1.2 Konu ile İlgili Çalışmalar

Joshi vd., 1975, ABD’de bulunan üç termik santralden elde ettiği uçucu külleri kohezyonlu bir zemine karıştırıp kompaksiyon deneyine tabi tutmuşlardır. Elde edilen karışımların standart proktor deneyi sonuçları incelendiğinde optimum su muhtevalarının arttığı, kuru birim hacim ağırlıklarının düştüğünü gözlemlemişlerdir.

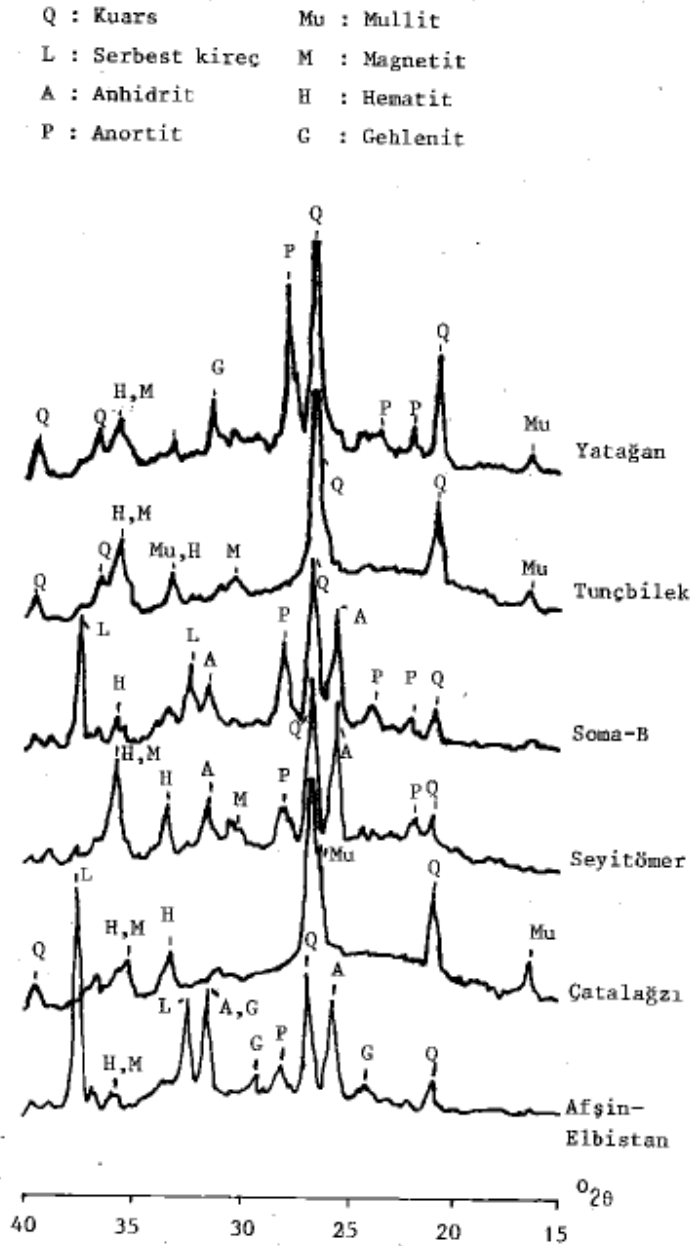
Parker vd., 1977, kalsiyum oksit içeriği %20’nin altında olan organik kile ağırlıkça %20 uçucu kül ekleyerek eşit enerjiyle sıkıştırdığı yapay zemin numunelerini serbest basınç deneyine tabi tutmuştur. 7 gün küre bırakılan bu numunelerin serbest basınç mukavemeti 1330 kN/m²’den 2880 kN/m²’ye yükselmiştir.

Tsonis vd., 1983, kum ve kil zeminlerin uçucu kül ile iyileştirilmesi üzerine yürüttükleri çalışmalarında farklı oranlarda karışımlar hazırlamış olup bu karışımları kompaksiyon deneyine tabi tutmuşlardır. Kil zemine %25 oranda uçucu kül katılması, maksimum kuru birim hacim ağırlığını 16 kN/m³’den 14 kN/m³’e %55 uçucu kül katılması ise 13 kN/m³ değerine düşmesine sebep olmuştur. Kum zemine %25 uçucu kül katılması maksimum kuru birim hacim ağırlığını 20 kN/m³’den 17,8 kN/m³’e %55 uçucu kül katılması ise 15kN/m³ değerine düşmesine sebep olmuştur. Optimum su muhtevası ise kum ve kil zeminlerde %25 ve %55 uçucu kül içeriğine göre sırasıyla %12’den %28’e, %20’den %28’e yükselmiştir.

Usmen vd., 1987, uçucu küllerin kompaksiyon özelliklerini inceledikleri çalışmalarında iki farklı termik santralden elde ettikleri F sınıfı uçucu küllere farklı oranlarda kireç ve çimento ilave etmişlerdir. Yapılan kompaksiyon deneyleri neticesinde kireç oranı artışının optimum su muhtevasında artışa, kuru birim hacim ağırlığı değerlerinde düşüşe sebep olurken, çimento katkısının kompaksiyon özelliklerine etki etmediği tespit edilmiştir.

Tokayay, 1989, beton yapımında kullanılan uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik yapılarının hidratasyon ve puzolanik özelliklerin üzerindeki etkisini incelemiştir. Uçucu küllerin su ve kireçle reaksiyonları sonucu meydana gelen bileşenleri 3, 7, 28, 90 günlük kür sürelerinde XRD yöntemiyle saptayan yazar taş kömürünün yakılmasıyla elde edilen Çatalağzı termik santrali uçucu külünün düşük kalsiyum oranı nedeniyle kireçle yaptığı reaksiyonların 90 gün civarında başladığını diğer yaşlarda herhangi bir reaksiyona rastlanmadığını, puzolanik reaksiyon sonucunda CSH jeli ve C₄AH₁₁ oluştuğunu

belirtmiştir. Çeşitli termik santrallere ait XRD pikleri Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1: Çeşitli termik santrallerden alınan uçucu küllerin X-Işınları difraktogramları (Tokyay, 1989).

Yazarın çalışması için kullandığı farklı santrallerden alınan uçucu küllerin kimyasal, mineralojik, pozolanik ve hidrasyon özellikleri, oluşum hızları bakımından birbirinden farklılık göstermiş olup, Çatalağzı, Tunçbilek ve Yatağan küllerinin pozolanik özellik gösterdiği belirlenmiştir. Potansiyel olarak betonda kullanılma imkânı olan bu küllerin çimentolu sistemlere katıldıklarında oluşturacakları etkiler ve nedenlerinin mineralojik açıdan araştırılması yapılan çalışma ile önerilmiştir. Çeşitli santrallerden alınan numunelerin

kimyasal ve mineralojik kompozisyonları Tablo 1.1 ve Tablo 1.2’de verilmiştir.

Tablo 1.1: Çeşitli termik santrallerden alınan uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları (Tokyay, 1989).

Oksit (%)	Afşin - Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma - B	Tunçbilek	Yatağan	TS 639	ASTM C618	
								C sınıfı	F sınıfı
SiO ₂	33.9	56.8	46.7	42.7	58.3	51.2	-	-	-
Fe ₂ O ₃	5.9	6.8	11.7	4.0	9.7	7.8	-	-	-
Al ₂ O ₃	12.5	24.1	13.8	20.2	22.1	22.9	-	-	-
S+F+A	52.3	87.7	72.2	66.9	90.1	81.9	> 70.0	> 70.0	> 50.0
CaO	35.5	1.4	12.3	24.5	2.1	13.0	-	-	-
MgO	1.9	2.0	4.7	1.3	4.8	2.8	< 5.00	<5.0	<5.0
SO ₃	7.2	2.9	5.5	4.4	0.4	0.3	< 5.00	<5.0	<5.0
K ₂ O	0.7	3.6	1.4	1.4	1.4	1.9	-	-	-
Na ₂ O	0.3	0.6	1.9	0.2	1.6	1.6	-	-	-
Toplam Alk.	0.8	3.0	2.8	1.1	2.5	2.9	-	<1.5	<1.5
Ti	0.7	1.1	0.7	0.7	1.1	0.9	-	-	-
K.K.	1.6	0.6	1.4	0.6	1.9	0.4	< 10.00	<12.0	<6.0

Tablo 1.2: Çeşitli termik santrallerden alınan uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları (Tokyay, 1989).

Mineral (%)	Afşin - Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma - B	Tunçbilek	Yatağan
Mullit	1.0	18.1	1.2	4.3	8.8	6.0
Kuars	4.5	10.9	5.6	5.1	13.9	22.4
Magnetit	0.8	0.2	2.5	0.6	4.1	2.9
Hematit	4.0	-	6.0	2.0	3.0	7.0
Serbest Kireç	18.6	0.7	5.5	9.8	0.9	1.0
Anhidrit	12.2	-	9.3	7.4	-	-
Anortit ve Gehlenit	~22	-	~15	~20	-	~25
Amorf ve Camsı faz	~35	~70	~50	~50	~70	~35

Chu ve Kao, 1993, zemin özelliklerinin kimyasal stabilizasyon yöntemleri ile iyileştirilmesi üzerine yaptıkları çalışmalarında düşük plastisiteli Tayvan kilini iyileştirmek üzere F sınıfı uçucu kül ve %20 oranında kireç içeren bakır cürufu kullanmışlardır. Farklı oranlarda cüruf (%10'dan az) ve uçucu külü (%20'den az) zemine katarak oluşturulan numuneler üzerinde serbest basınç ve üç eksenli basınç deneyi yapan araştırmacılar Tayvan kiline yapılan bu katkıların zeminin kohezyon ve kayma mukavemeti gibi mekanik parametrelerini arttırdığını belirlemişlerdir.

Tan ve İyisan, 1996, düşük plastisiteli (CL) Kemerburgaz killерinin uçucu kül takviyesiyle mukavemet karakteristiklerinin değişimini inceledikleri çalışmalarında, hazırladıkları numuneleri üç eksenli basınç deneyine tabi tutmuşlardır. Bir günlük kür süresinde dahi uçucu kül katkısının kayma dayanımını önemli derecede arttırdığını tespit etmişlerdir.

İmançlı, 2002, Yatağan termik santraline ait uçucu kül ile Denizli ili Derekavuştu bölgesinden temin edilen zemin örneklerini ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında kül içerecek şekilde karıştırarak hazırlamıştır. Hazırlanan numunelerin sıkışma, mukavemet, şişme potansiyeli ve geçirgenlik etkilerini 7, 15, 30, 90 günlük kür sürelerinde incelemiştir. Yazar kıvam limitleri deneyleri bulgularına göre zeminin artan uçucu kül oranlarında sıkışma ve şişme potansiyellerinin azaldığını, işlenebilirliğin arttığını not etmiştir (Tablo 1.3).

Standart proktor deneyi sonuçlarına göre artan uçucu kül oranlarında maksimum kuru birim hacim ağırlık azalmış, optimum su muhtevası artmıştır (Tablo 1.4). Serbest basınç dayanımı deneyi sonuçları Tablo 1.5’ de verilmiştir. Kayma mukavemeti parametresini araştırmak üzere kesme kutusu deneyleri yapan yazar, kayma mukavemeti sonuçlarının serbest basınç deneyi sonuçlarıyla paralellik gösterdiğini gözlemlemiştir. Kesme kutusu deney sonuçlarına göre artan uçucu kül oranı ve kür sürelerinde içsel sürtünme açısındaki artışlar düşük mertebede kalırken genel olarak mukavemet artışı kohezyondaki artış ile sağlanmıştır. Geçirimlilik deney sonuçları incelendiğinde artan katkı oranlarında permeabilitenin arttığı ancak kür süresinin artmasıyla artan dayanıma paralel olarak permeabilitenin düşük mertebelerde azaldığı kayıt edilmiştir. Konsolidasyon deneyi sonuçlarına göre zeminin başlangıç boşluk oranı artan uçucu kül oranı ile artmış, zamanla dayanım kazanan numunelerin sıkışma sayıları ve hacimsel sıkışma katsayıları küçük mertebelerde çıkmış, konsolidasyon oturması minimum düzeye inmiştir.

Tablo 1.3: Karışım oranı ve kür süresinin kıvam limitlerine etkisi (İmançlı, 2002).

Katkı Oranı	Kürsüz			15 Gün			30 Gün			90 Gün		
	W _L (%)	W _P (%)	I _P (%)	W _L (%)	W _P (%)	I _P (%)	W _L (%)	W _P (%)	I _P (%)	W _L (%)	W _P (%)	I _P (%)
Doğal zemin	37	20	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
%10 Uçucu kül katkılı	38	24	14	37	25	12	35	26	11	35	27	8
%20 Uçucu kül katkılı	39	31	8	37	32	5	36	32	4	36	32	4

Tablo 1.4: Doğal zemin, uçucu kül ve katkılı zeminlerin γ_{kmak} ve W_{opt} değerleri (İmançlı, 2002).

Deney Örneği	W _{opt} (%)	γ_{kmak} (kN/m ³)
Doğal zemin	14.80	18.28
Uçucu kül	20,00	13,00
%10 Uçucu kül katkılı	15.20	17.62
%20 Uçucu kül katkılı	16,00	17.03

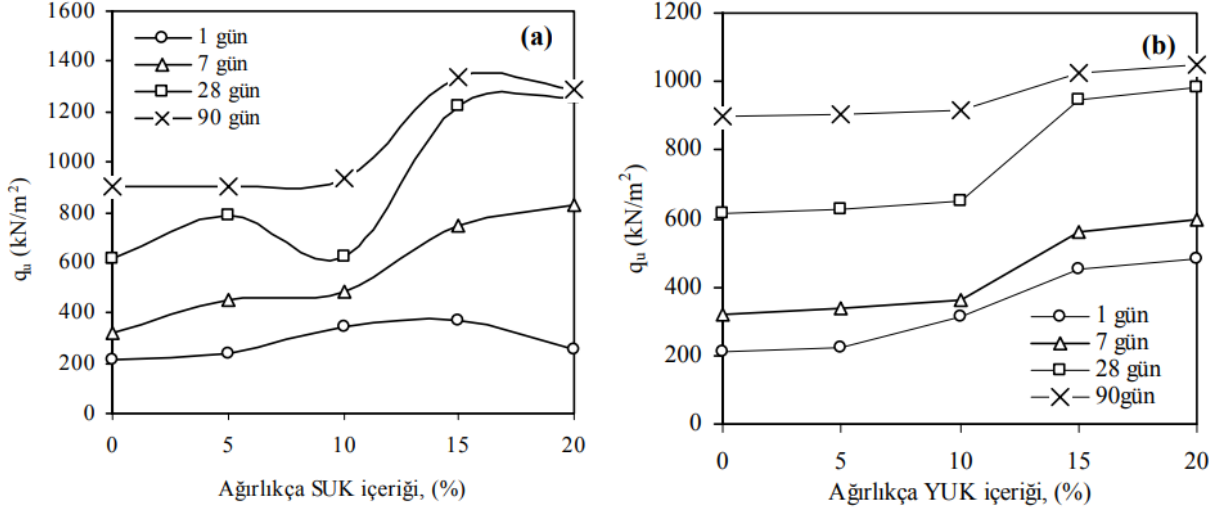
Tablo 1.5: Katkı oranı ve kür süresine göre serbest basınç deneyi mukavemet değerleri (kN/m²) (İmançlı, 2002).

Karışım / Kür Süresi	Kürsüz	7 Gün	15 Gün	30 Gün	90 Gün
Doğal zemin	380	-	-	-	-
Uçucu kül	266	375	422	485	678
%10 Uçucu kül katkılı	242	405	452	513	740
%20 Uçucu kül katkılı	320	618	880	1525	

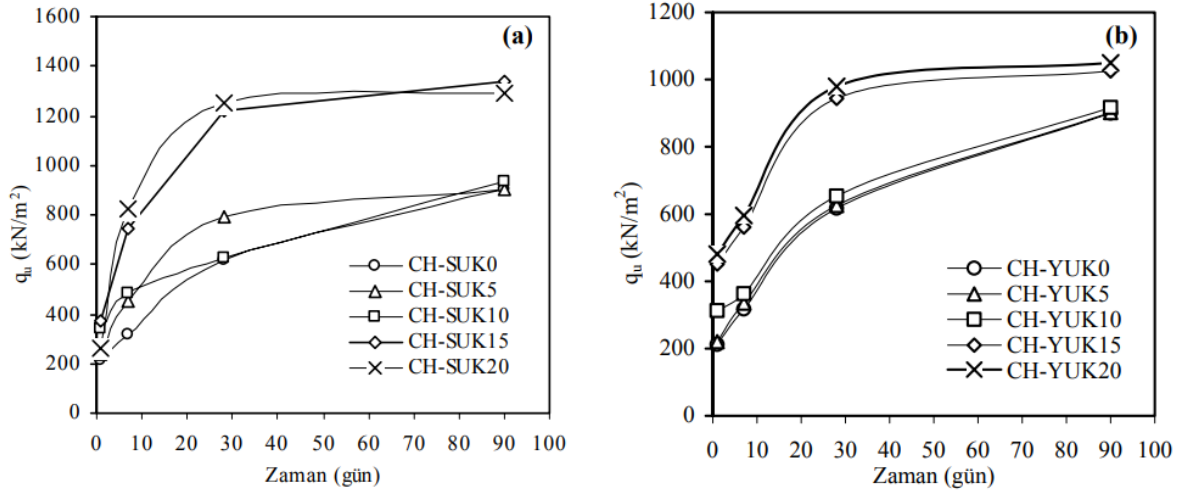
İnan vd., 2005, Yatağan termik santraline ait C sınıfı uçucu kül ile Soma termik santraline ait C ve F sınıfına dahil olmayan uçucu kül malzemeleri, İzmir ili Çiğli ilçesinden temin edilen yüksek plastisiteli kil (CH) zemin ile ağırlıkça belli oranlar dahilinde %0, %5, %10, %15, %20 karıştırıp serbest basınç deneyinde test etmek üzere optimum su muhtevasında, eşit enerjiyle sıkıştırmışlardır. Deney numuneleri $23 \pm 1,7$ °C ve $\%60 \pm 10$ bağıl nemde streç film ile sarılı olarak 1, 7, 28, 90 günlük kür sürelerince bekletilmiştir. Standart proktor deney sonuçlarına göre artan oranlarda uçucu kül takviye edilmesi zeminlerin maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında azalmaya, optimum su muhtevalarında artışa sebep olduğunu gözlemlemişlerdir. Standart Proktor deney sonuçları Tablo 1.6’da verilmiştir. Numunelerin kırılma anındaki su muhtevaları kür süreci başındaki su muhtevalarına oranlandığında %40-45’e varan azalmalar görülmüştür. Bu durum dayanımdaki artışın bir sebebi olarak gösterilebilir aynı zamanda uçucu külün zemine ilavesi zeminin plastisitesini kaybedip gevrek davranmasına neden olmuştur. Kireç içeriği fazla olan Soma uçucu küllü karışımlar, 90 günlük serbest basınç dayanımı deneyi kırım sonuçlarına göre %18’e varan dayanım artışları sergilemiştir. Her iki deney setinde de serbest basınç dayanımları %15 uçucu kül oranına kadar artış göstermekle beraber %20 uçucu kül katkı katılması numunelerde ihmal edilebilir seviyelerdeki artışlara sebep olmuştur. Farklı oranlarda uçucu kül ilavesi eklenen karışımların serbest basınç dayanımlarında 28. güne kadar hızlı bir artış sergilemekte, 28. günden sonra artış ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır (Şekil 1.2-1.3).

Tablo 1.6: Doğal zemin ve uçucu kül katkılı zeminlerin γ_{kmak} ve w_{opt} değerleri (İnan vd., 2005).

Karışım No:	Uçucu Kül (%)	Zemin (%)	Yatağan Uçucu Külü		Soma Uçucu Külü	
			w_{opt} (%)	γ_{kmak} (kN/m ³)	w_{opt} (%)	γ_{kmak} (kN/m ³)
1	0	100	16.15	17.30	16.15	17.30
2	5	95	15.93	18.30	14.23	22.50
3	10	90	15.22	19.20	14.13	22.90
4	15	85	14.80	20.10	13.83	23.00
5	20	80	13.95	21.80	13.64	24.00



Şekil 1.2: Uçucu kül içeriği ile serbest basınç dayanımı değişimi (a: Soma, b: Yatağan) (İnan vd., 2005).



Şekil 1.3: Kür süresi ile serbest basınç dayanımı değişimi (a: Soma, b: Yatağan) (İnan vd., 2005).

Türker ve Çokça, 2006, şişme potansiyeli yüksek zeminlerin C ve F tipi uçucu kül katkısı kullanarak stabilizasyonu üzerine çalışmışlardır. Zeminlerin serbest şişme basınçları, doygunluk ve su emme kapasitelerini inceledikleri çalışmalarında C tipi uçucu küllerin şişme potansiyelinin düşürülmesinde daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Aksoy vd., 2008, Tunçbilek termik santraline ait uçucu kül ile killi bir zemini stabilize etmişlerdir (Tablo 1.7). Zemine değişen oranlarda %3, %5, %7, %10 uçucu kül katan araştırmacılar numuneleri 1, 7, 30 gün kür sürelerinde serbest basınç deneyine tabi tutmuşlardır. Serbest basınç deneyi sonuçları irdelendiğinde artan oranda uçucu kül

katkısının mukavemeti olumlu yönde etkilediği, kıvam limitleri ve kompaksiyon deneyleri sonuçlarını incelediklerinde katkının plastisiteyi pek etkilemezken, optimum su muhtevasını arttırdığını gözlemlemişlerdir (Tablo 1.8).

Tablo 1.7: Deneyde kullanılan killi zemine ait bazı özellikler (Aksoy vd., 2008).

Doğal birim hacim ağırlığı (γ_n , kN/m ³)	19.30
Dane birim hacim ağırlığı (γ_s)	2.65
Doğal su muhtevası (w , %)	20.80
Optimum su muhtevası (w_{opt} , %)	21.50
Maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmak} , kN/m ³)	15.90
Likit limit (w_L , %)	49.00
Plastik limit (w_P , %)	24.50
Plastisite indisi (I_P , %)	24.50
Aktivite	1.42
Serbest basınç day. (örselenmemiş) (q_u , kN/m ²)	17.05
Serbest bas. day. (lab. hazırlanmış) (q_u , kN/m ²)	14.70

Tablo 1.8: Deney numunelerinin Atterberg limitleri ve standart proktor deneyi sonuçları (Aksoy vd., 2008).

Mühendislik Özelliği	Uçucu kül içeriği			
	0%	3%	5%	10%
Likit limit (%)	49	49	50	49
Plastik Limit (%)	24.5	21	21	21
Optimum Su Muhtevası (%)	21.5	21.5	22.5	23
Maks. Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	15.9	15.6	15.5	15.4

Das vd., 2009, yol altyapısı projelerinde dolgu malzemesi olarak kullanılan termik santral atığı uçucu küllerin yayılma, büzülme etkilerinden dolayı altyapı bünyesinde meydana getirdiği dayanım kayıplarının geofiber donatılarla desteklenmesi üzerine yürüttükleri çalışmalarında büzülme etkisinden kaynaklanan dayanım kayıplarının geofiber donatı kullanarak aşılacağı, nihai taşıma gücünü arttıracaklarını gözlemlemişlerdir.

Aytekin, 2009, Afşin-Elbistan termik santraline ait uçucu kül ile Osmaniye ili Almanpınarı kil yataklarından temin ettikleri illit ağırlıklı kil zemininin iyileştirilmesi üzerine çalışmıştır. Kil zemin %10 ve %20 oranlarında uçucu kül ekleyerek hazırladığı yapay zemin örneklerini 1, 8, 16, 32 gün kürde bekletip numuneleri zemin sınıflama, konsolidasyon, üç eksenli

konsolidasyonsuz drenajsız basınç deneylerine (UU) tabi tutmuştur. Yaptığı deneyler sonucunda uçucu kül katkısının kayma dayanımını, konsolidasyon hızını arttırdığını, permeabilityi azalttığını, zamana bağlı olarak kayma dayanımını arttırdığını tespit etmiştir (Tablo 1.9).

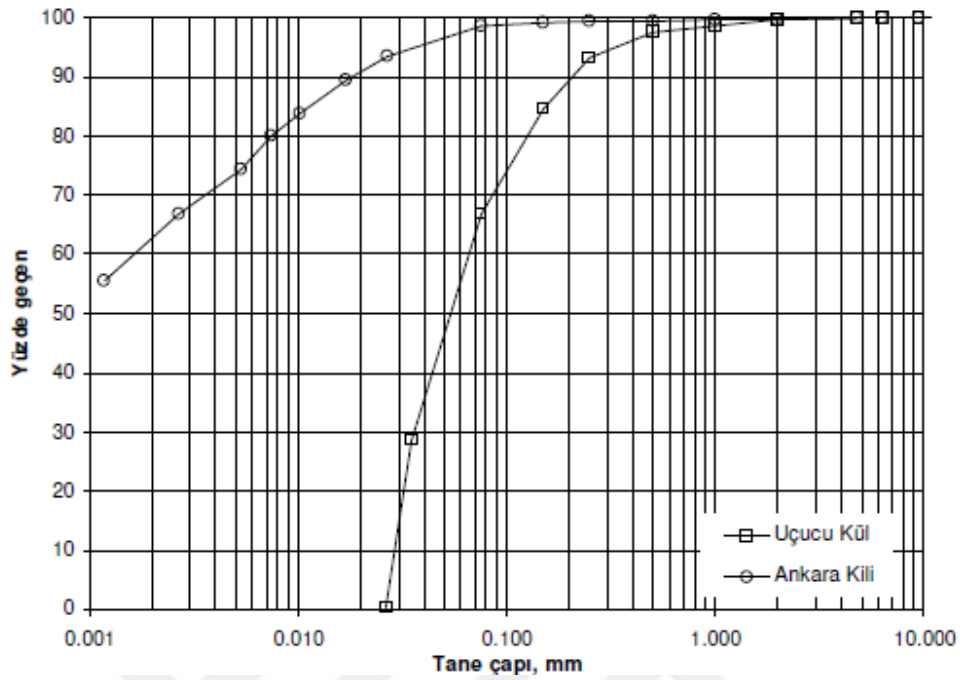
Tablo 1.9: UU sonuçlarına göre kayma mukavemeti parametreleri (Aytekin, 2009).

Kayma Mukavemeti Parametreleri	1 Gün		8 Gün		16 Gün		32 Gün	
	c (g/cm ²)	ϕ (°)	c (g/cm ²)	ϕ (°)	c (g/cm ²)	ϕ (°)	c (g/cm ²)	ϕ (°)
Zemin	160	21	-	-	-	-	-	-
%10 Uçucu Kül Katkılı Numune	124	23	174	29	194	34	225	35
%20 Uçucu Kül Katkılı Numune	107	26	213	32	241	39	268	43

Alkaya, 2009, ülkemizdeki uçucu küllerin mühendislik özellikleri üzerine yapılan çalışmaları incelemiş, atık malzeme olan uçucu külün zemin iyileştirmelerinde, dolgular ve diğer zemin yapılarında yan ürün olarak kullanılabileceğine değinmiştir. Doğal malzeme kullanımının azalmasıyla doğanın daha az tahrip edileceğine dikkat çekmiştir. Uçucu kül kullanımının artması depolanma ile oluşan çevresel sorunları azaltacak, termik santrallerin verimliliğinin artmasına sebep olacağını söylemiştir.

Yılmaz ve Sevensan, 2010, Çayırhan termik santralinden temin ettikleri Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete (ASTM C618) standardına göre C sınıfı kül malzeme ile Ankara ilinin Çukurambar bölgesinden temin ettikleri Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (ASTM D2487) standardına göre CH sınıfı kil malzemeyi kuru ağırlıkça %0, %10, %20, %30 oranlarında karıştırıp, karışımlar üzerinde standart proktor deneyi yapmışlardır. Optimum su içeriğinde, standart enerjiyle hazırlanan numuneleri 1, 7, 14, 28 gün kür sürelerince bekleterek tek eksenli basınç deneylerine tabi tutmuşlardır (Şekil 1.4). Standart proktor deneyi sonuçlarına göre artan uçucu kül oranlarında optimum su içeriğinin azalma, maksimum kuru birim hacim ağırlığı değerinin ise artma eğilimi gösterdiğini gözlemlemişlerdir. 1, 7 günlük kür sürelerinde, karışımdaki uçucu kül miktarının %10'un üzerinde olmasının tek eksenli deney sonuçlarına katkısının yok denecek kadar az olduğunu, 14, 28 günlük kür sürelerinde ise karışımdaki uçucu kül miktarının artmasının tek eksenli basınç dayanımı sonuçlarını arttırdığını tespit etmişlerdir. Serbest

basınç deneyi sonuçları Tablo 1.10'da verilmiştir.



Şekil 1.4: Ankara Çukurambar killi zemin numunesi ve Çayırhan Termik Santrali uçucu külüne ait dane boyutu dağılım eğrileri (Yılmaz ve Sevensan, 2010).

Tablo 1.10: Karışımların serbest basınç deneyi sonuçları (Yılmaz ve Sevensan, 2010).

Kür Süresi	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)			
	Uçucu kül / Kil %0	Uçucu kül / Kil %10	Uçucu kül / Kil %20	Uçucu kül / Kil %30
1 Gün	231.0	294.1	264.8	241.4
7 Gün	201.0	339.7	310.7	355.5
14 Gün	222.2	301.5	388.0	491.0
28 Gün	196.2	306.1	397.4	546.2

Çetin, 2011, Yüksek plastisiteli kil zeminlerin uçucu kül, eskitilmiş kopolimer, ağ yapılı polipropilen fiberlerin katkılarıyla taşıma gücünün artırılmasına yönelik yürüttüğü deneysel çalışmada; Çayırhan termik santralinden alınan C sınıfı uçucu kül ile İstanbul Eyüp Akpınar bölgesinden alınan CH sınıfı kil malzemeleri kuru ağırlıkça %0, %5, %10, %15 oranlarında karıştırıp 7 gün nem odasında bekletmiştir. Bununla birlikte kür süresi sonunda numuneleri serbest basınç deneyine tabi tutup mukavemetlerini belirlemiştir. Yalın numune serbest basınç mukavemeti 170,5 kN/m² değerini sergilerken, %10 uçucu kül-%90 kil ihtiva eden deney setinden elde edilen maksimum serbest basınç mukavemeti değerinin 475 kN/m² olduğunu saptamıştır (Tablo 1.11).

Tablo 1.11: Yalın numune ve uçucu kül ile hazırlanmış standart proktor ve serbest basınç deneyi sonuçları (Çetin, 2011).

Açıklama	W_{opt} (%)	γ_{kmak} (%)	q_u kN/m ²
CH + %0 Uçucu kül	27	15	170.5
CH + %5 Uçucu kül	24	15.6	314
CH + %10 Uçucu kül	24	15.6	475
CH + %15 Uçucu kül	25	15.5	326

Ünver, 2015, Çatalağzı termik santraline ait Çatalağzı Termik Santrali uçucu külü (ÇUK) F sınıfı, Soma termik santraline ait Soma Termik Santrali uçucu külü (SUK) C sınıfı uçucu küller ile Afyon ilinden alınan CL sınıfı kil zemin sırasıyla karıştırarak farklı uçucu küllerin zeminin mühendislik özellikleri üzerine etkisini araştırmıştır. Elde ettiği numunelere sırasıyla sınıflama, kıvam limitleri, kompaksiyon, şişme yüzdesi, serbest basınç deneyi, iğne deliği ve dağılma deneyleri yapmıştır. Bu deneyler sonucunda C sınıfı uçucu külün F sınıfı uçucu küle göre zeminin şişme potansiyelini düşürdüğünü, dayanımını artırdığını, dipersibilitesini azalttığı sonucuna varmıştır. Farklı katkı seviyelerinde yapılan tek eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre artan katkı oranıyla birlikte dayanımın da arttığını gözlemlemiştir (Tablo1.12).

Tablo 1.12: Yalın numune ve uçucu kül ile hazırlanmış numunelerin laboratuvar deney sonuçları (Ünver, 2015).

Açıklama	γ_{kmak} (Mg/m ³)	W_{opt} (%)	Şişme Yüzdesi (%)	Şişme Basıncı (kPa)	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	Eksenel Deformasyon (%)
CL	1.653	18.70	5.41	62.21	257.60	1.44
CL + %5 ÇUK	1.632	19.00	5.55	34.20	305.70	1.51
CL + %10 ÇUK	1.611	19.30	4.00	36.01	317.50	2.50
CL + %15 ÇUK	1.577	19.90	3.18	37.83	336.10	1.48
CL + %20 ÇUK	1.543	20.50	2.71	31.65	307.90	2.97
CL + %25 ÇUK	1.529	21.15	1.54	16.73	430.70	3.47
CL + %30 ÇUK	1.515	21.80	0.88	7.28	444.90	3.48
CL + %5 SUK	1.600	20.50	0.68	7.64	459.90	1.47
CL + %10 SUK	1.548	22.30	2.39	29.83	476.50	3.57
CL + %15 SUK	1.534	22.95	2.97	29.10	729.50	0.96
CL + %20 SUK	1.520	23.60	1.80	27.65	765.20	1.48
CL + %25 SUK	1.500	24.25	1.51	20.01	784.30	1.50
CL + %30 SUK	1.487	24.90	1.29	9.82	862.90	1.50

Yılmaz, 2016, Bayburt ili Demirözü ilçesinden temin ettiği düşük plastisiteli kil zemin ile puzolanik malzeme olan uçucu külü %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında karıştırarak 50 mm çapında 100 mm uzunluğunda 42 adet silindirik numuneyi laboratuvar ortamında standart enerji ile sıkıştırarak hazırlamış ve 7, 28 gün küre bırakmıştır. Kürlenmiş bu numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılmış; numunelerin kırılma davranışları incelendiğinde gevrek bir şekilde kırıldıklarını, kırılan bu numunelerin sert olduklarını, yapay puzolan olan uçucu külle oluşturulan bu karışımların yüksek dayanım sergileyen tek eksenli dayanım sonuçlarını 28 günlük küre tabi tutulan %25 uçucu kül katkılı numunelerden elde edildiğini not etmiştir. Karışımlara ait kıvam limitleri, standart proktor ve serbest basınç deneyleri sonuçları Tablo 1.13, Tablo 1.14 ve Tablo 1.15’te verilmiştir.

Tablo 1.13: Yalın numune ve uçucu kül ile hazırlanmış numunelerin Atterberg kıvam limitleri deney sonuçları (Yılmaz, 2016).

Deney Numuneleri	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndisi (%)
CL	48.8	26.5	22.3
CL + %5 Uçucu kül	45	34	11
CL + %10 Uçucu kül	44.8	33.8	11
CL + %15 Uçucu kül	44.3	33.5	10.8
CL + %20 Uçucu kül	43.4	33.2	10.2
CL + %25 Uçucu kül	42.7	33	9.7
CL + %30 Uçucu kül	42	32	10

Tablo 1.14: Yalın numune ve uçucu kül ile hazırlanmış numunelerin standart proktor deney sonuçları (Yılmaz, 2016).

Deney Numuneleri	W_{opt} (%)	γ_{kmax} (kN/m³)
CL	23	1.63
CL + %5 Uçucu kül	22	1.58
CL + %10 Uçucu kül	24	1.59
CL + %15 Uçucu kül	24	1.6
CL + %20 Uçucu kül	23	1.58
CL + %25 Uçucu kül	22	1.57
CL + %30 Uçucu kül	22	1.56

Tablo 1.15: Yalın numune ve uçucu kül ile hazırlanmış numunelerin serbest basınç deneyi sonuçları (Yılmaz, 2016).

Deney Numuneleri	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)	
	7. Gün	28. Gün
CL	144.6	148.3
CL + %5 Uçucu kül	170.9	301
CL + %10 Uçucu kül	326.5	556.1
CL + %15 Uçucu kül	1153	1540.8
CL + %20 Uçucu kül	1575	1944.9
CL + %25 Uçucu kül	2107.1	2739.8
CL + %30 Uçucu kül	1795.9	2465.9

1.3 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Killi zeminler mineralojik özelliklerine, kimyasal içeriklerine, atom dizilişlerine göre farklılıklar gösterebilmektedir. Problemlili killi zeminler ise büzülme, kabarma, düşük taşıma kapasitesi nedeniyle yapıların kullanım güvenliğini yitirmesine neden olacak biçimde taşıyıcı sisteminde meydana gelen yapısal hasarlara sebep olabilmektedir. Kömürle çalışan termik santrallerde baca gazlarıyla taşınan ve çok ince taneye sahip olan uçucu külün havaya karışması çevresel bir sorun ortaya çıkaracağından dolayı, baca gazlarından elektrostatik ve mekanik yöntemle toplanmaktadır. Kullanım alanının kısıtlı olması sebebiyle uçucu kül atığı, termik santrallerde veya başka uygun yerlerde depo edilir. Depolanan bu ürünler yağmur ve yüzeysel sulara karışıp sızma yaparak yer altı sularımızı kirletmekte, soluduğumuz havaya karışmaktadır. Uçucu külün özellikleri yakılan kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Öyle ki zemin bünyesinde birçok farklı kil minerali bir arada bulunabileceği gibi uçucu külün kimyasal içeriği santralde o gün yakılan kömüre göre farklılık gösterebilmektedir.

Günümüzde zeminlerin iyileştirilmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Uygulamalarda genellikle, öngörülen yeterli dayanımın sağlandığı ekonomik çözümler tercih edilir. Killi zeminlerin kimyasal yöntemle stabilizasyonunda çimento, kireç gibi katkı malzemeleri yerine uçucu kül kullanılması uçucu külün atık bir malzeme olması nedeniyle daha ekonomiktir. C sınıfı uçucu küllerin F sınıfı uçucu küllere nazaran kimyasal stabilizasyonda zemin mukavemetlerini daha fazla arttırdığı bilinmektedir. Yapılan bu çalışmada F sınıfı Çatalağzı uçucu külünün tercih edilmesinin sebebi termik santralin bölgeye olan

yakınlığıdır. Böylelikle depo yerinden iyileştirme yapılması planlanan sahaya stabilizasyon malzemesinin nakli daha ekonomik olacaktır.

Uçucu küllerin ekolojik döngüye dahil edilmesi, herhangi bir çevresel zarara sebep olmaksızın dönüştürülmesi için yeryüzüne dağıtılması, doğal bir filtre olan zemin tarafından dönüşümünün sağlanması gerekmektedir. Bu kapsamda killi bir zeminin uçucu kül atığı ile iyileştirilmesi araştırılmış olup, çevresel zararın azaltılması için yüksek dayanımın sergilendiği minimum uçucu kül katkı oranı belirlenmeye çalışılmıştır.

Geoteknik açıdan problemlili yüksek plastisiteli killi zeminlerin termik santral atığı uçucu küllerle iyileştirilmesi uçucu külün depolanması sonucu oluşan çevresel problemlerin azalmasını sağlar. Ayrıca uçucu külün doğal malzemenin yerini almasıyla doğaya verilen zarar azalmış olur. Bu iyileştirmeyle büzülme, şişme ve mukavemetin yetersiz olması, permeabilite, sıkışabilirlik ve konsolidasyon gibi zayıf zemin problemlerinin aşılarda projede öngörülen limitleri sağlayan stabilize edilmiş zeminlerin oluşturulmasına olanak sağlanmaktadır. Yapılan bu tez çalışmasıyla uçucu kül ilavesi yapılan killi zeminlerin mekanik özelliklerinin hangi oranlarda iyileştiği belirlenmeye çalışılmıştır.

Tez kapsamında yapılan bu çalışma ile, Bartın ili Kutlubey-Yazıcılar bölgesi killilerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 gibi değişik oranlarda Çatalağzı B Termik Santrali'ne ait atık uçucu kül katılarak elde edilecek olan karışımların sıkışabilme özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra hazırlanan bu karışımlar optimum su muhtevalarında sıkıştırılarak 1, 8, 16 ve 32 gün kürde bekletildikten sonra UU yapılarak killi zeminlerin kayma mukavemeti parametrelerinin değişimi araştırılmıştır. Çalışmanın son aşamasında gerçekleştirilen Taramalı Elektron Mikroskobu deneyi (SEM) ve X Işını Kırınımı deneyi (XRD) analizleri ile farklı miktarlarda karıştırılan uçucu kül oranlarının kildeki kohezif yapıyı hangi oranda değiştirdiği belirlenmeye çalışılmıştır.

BÖLÜM 2

ZEMİNLERDE KAYMA MUKAVEMETİ VE KIRILMA HİPOTEZLERİ

2.1 Zeminlerde Kayma Direnci

İnşaat yapılarına ait temeller konumlandığı zeminler üzerinde normal gerilmelerin yanında önemli derecede kayma gerilmeleri de meydana getirmektedirler. Zemin ve kayaların kendi yükleri, alt yapı, üst yapı yükleri, yağmur suları gibi statik ve dinamik yüklerin zeminde oluşturdukları kayma gerilmeleri kaya veya zeminin kayma dayanımıyla (kayma direnciyle) karşılanır. Kayma direncinin mevcut kayma gerilmelerini karşılayamayıp yenildiği duruma zemin yenilmesi adı verilir.

Mühendislik yapılarında kullanılan çelik, demir, plastik gibi homojen ve izotrop kabul edilen malzemelerde kayma dayanımı moleküler yapıları tarafından kontrol edilirken ayrık malzemeler topluluğu olan zemindeki kayma direnci çoğu zaman münferit partiküllerin moleküler bağlarının kırılmasını gerektirmez. Kayma direnci daha çok münferit partiküllerin birbiri üzerinde kayması ve/veya yuvarlanmasını sağlayacak kadar olduğunda kesme yenilmesi oluşur. Daneler arasındaki etkileşim sürtünme dayanımı ve kohezyon dayanımı olarak sınıflandırılabilir. Sürtünme kabulü temel fizik problemlerinde olduğu gibidir, kaymaya karşı koyan kuvvet normal kuvvet ile sürtünme katsayısının çarpımına eşittir. Fakat zemin mekaniğinde sürtünme katsayısı (μ) yerine efektif içsel sürtünme açısı (ϕ') kullanılarak tanımlanmaktadır (Denklem 1). Efektif içsel sürtünme açısının değeri münferit partiküllerin ve zemin daneleri arasında deformasyona direnen kilitlenme mekanizmasının sürtünme özelliklerine bağlıdır (Coduto, 2011).

$$\phi' = \tan^{-1} \mu \quad (1)$$

İçsel sürtünme açısının değeri zemin partiküllerinin ve onlardan oluşan birimlerin şekil, gradasyon, boşluk oranı, mineraloji, organik madde içeriğini ve su muhtevasından etkilenmektedir. Modern zemin mekaniğinin kurucusu Karl Von Terzaghi (1925) mühendislik uygulamalarında zeminde karşılaşılan güçlükler zeminin kendisinde ziyade

boşluklarındaki sudan ileri geldiğini, su bulunmayan bir gezegende zemin mekaniğine ihtiyaç olmayacağını dile getirmiştir. Yeraltı suyunun yükselmesi boşluk suyu basıncını (u) arttırıp efektif gerilmeyi (σ') azaltır. Böylelikle sürtünme dayanımında azalma meydana gelmektedir. Yeraltı suyu şartlarındaki değişiklikler suyun sürtünme dayanımı üzerindeki etkilerinin önemli bir kısmını oluşturmakla beraber ıslanan zeminlerde suyun oluşturduğu yağlama etkisinin de sürtünme dayanımı üzerinde etkileri olmaktadır.

Efektif gerilmenin sıfır olduğu veya sıfır kabul edildiği durumlarda zeminin kaymaya karşı direnç göstermesi kohezyon dayanımı olarak açıklanabilir. Bu dayanım efektif kohezyon (c') olarak tanımlanır. Gerçek ve görünür kohezyon olmak üzere iki çeşit kohezyon dayanımından bahsedilebilir. (Mitchell, 1993).

Gerçek kohezyon zemin partikülleri arasındaki çimentolanma, adezyon gibi bağlardan kaynaklanan kayma dayanımıdır. Görünür kohezyon gizlenmiş sürtünme dayanımıdır. Görünür kohezyon gerilme analizinde hesaba katılmayan negatif boşluk suyu basınçlarından, genleşmeden dolayı zeminde açığa çıkan boşluk suyu basınçlarından, partiküller arası kenetlenmenin gözlemlendiği zeminlerde gelişen görünür mekanik kuvvetlerden ibarettir.

Geoteknik mühendisleri killi zeminleri tanımlarken genellikle kohezyonlu zeminler olarak tarif ederler, ne var ki kohezyonlu zeminlerde kohezyon dayanımının büyük bir kısmı hidrostatik basınçtan düşük negatif boşluk suyu basıncından kaynaklanan görünür kohezyondur. Bu tip zeminlerde kohezyon dayanımı fiziksel bir gerçeklik yerine matematiksel bir idealleştirme olarak kabul edilebilir.

2.1.1 Zeminlerde Gerilme-Gerinim Eğrisi

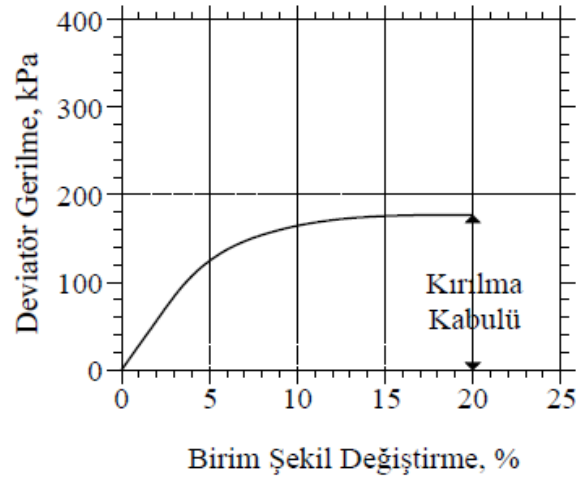
Zeminlerin maruz kaldığı gerilmeler altındaki şekil değiştirme davranışı diğer yapı malzemelerine göre daha karmaşıktır. Zeminler yük altında, zamana bağlı olarak konsolide olurlar. Zeminlerin başlangıç gerilme durumu, gerilme tarihçesi, yükleme hızı, drenaj durumu ve zamana bağlı visko plastik davranışı gibi etkiler gerilme-şekil değiştirme davranışını doğrudan etkiler. Bir zemin numunesi üzerine uygulanan kuvvetler neticesinde zeminde oluşan gerilmeler belirli sınırları aştığında numunede göçme diye tabir edilen durum gerçekleşir. Sünek malzemelerde akma tipi göçme gerçekleşirken gevrek

malzemelerde ani göçme gözlemlenmektedir. Zeminlerde ise göçme mekanizması zeminin cinsine (kil, silt, kum, çakıl, organik içerikli zeminler, vs.) ve bazı fiziksel özelliklerine (su içeriği, boşluk yapısı, vs.) bağlı olmakla beraber müsaade edilebilir şekil değiştirme seviyelerinin aşılması olarak kabul edilmektedir. Bir zeminin maruz kaldığı gerilmeleri karşılayamayıp yenilme durumuna ulaşmak üzere olduğu anda plastik dengeye eriştiği kabul edilir. Temellerin taşıma gücü hesapları, şev stabilitesi hesapları, istinat yapıları hesapları başlıca stabilite problemleridir ve zeminlerin plastik dengeye ulaştığı kabulüne göre güvenlik katsayılarıyla emniyete alınarak mühendislik hesaplamaları yapılır.

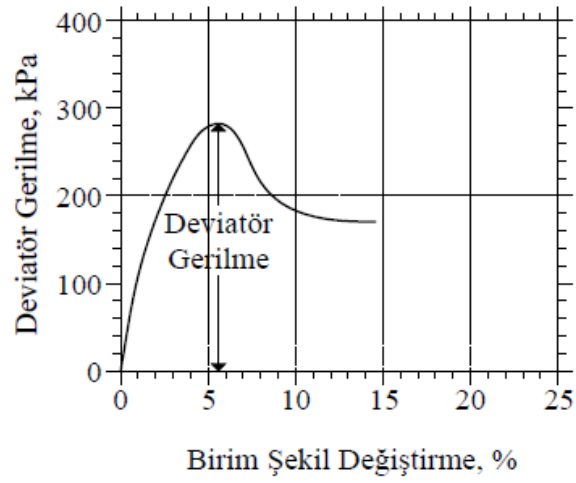
2.1.2 Kırılma Yenilme Kriteri

Kil zeminler üzerinde yapılan çalışmalar doğrultusunda zemin yenilmesinin (kırılma, göçme) öncelikle gerilme-şekil değiştirme özelliklerine bağlı olduğu tespit edilmiştir.

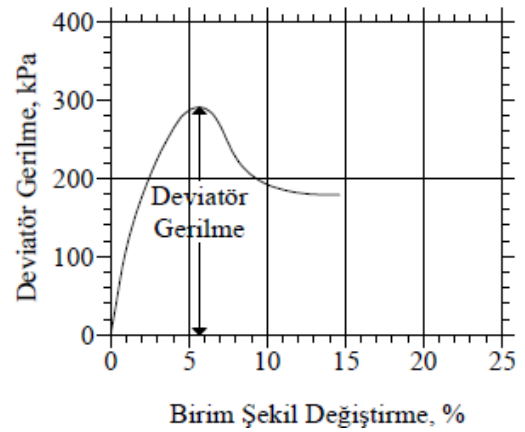
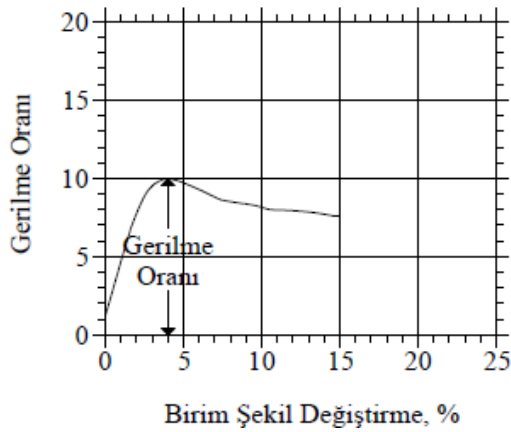
- Doruk değer göstermeyen normal konsolide kil zeminlerde kırılmanın %20 birim şekil değiştirme değerinde olduğu kabul edilebilir (Şekil 2.1).
- Doruk değer küçük birim deformasyon değerlerinde (%20 birim şekil değiştirmeye ulaşmadan) görülmesi halinde kayma direnci o noktada oluşan gerilme değerleri üzerinden hesaplanmaktadır (Şekil 2.2).
- Kuvvet etkisi altında zemin maksimum deviatör gerilmeye ($\sigma_1 - \sigma_3$) ulaşmadan, zemin bünyesine nüfuz eden asal gerilmelerin oranı (σ_1 / σ_3) bir tepe noktasından geçiyorsa bu doruk noktasındaki gerilme değerleri kırılma değerleri olarak kabul edilir (Şekil 2.3).
- Kütleli olarak yer değiştirmiş bir heyelan probleminde kayma direnci, kalıntı (residuel) direnç olarak kabul edilir (Şekil 2.4).



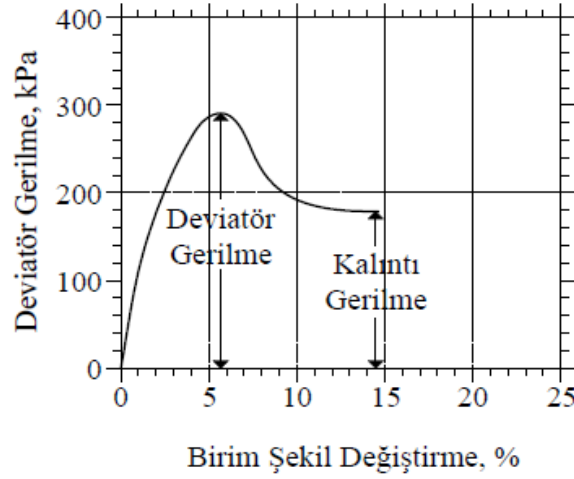
Şekil 2.1: Doruk değer göstermeyen bir zemin numunesine ait örnek grafik.



Şekil 2.2: Doruk değerın küçük birim deformasyon değerlerinde görülmesi durumuna ait örnek grafik.



Şekil 2.3: Maksimum deviator gerilmeye ulaşmadan gerilme oranının pik yaptığı duruma ait örnek grafik.



Şekil 2.4: Kalıntı dirence ait örnek grafik.

2.2 Zeminlerde Kırılma Hipotezleri

Statik kuvvet etkisi altında zeminde meydana gelen oyukların genişlemesi veya daralması bir boyutlu sınır değer problemleridir. Sınır değer problemlerinin sürekli ortam mekaniği ilkeleri kullanılarak çözülmesi için zeminin gerilme-gerinim ilişkilerinin tanımlandığı bünye modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayırık malzemeler topluluğu olan zeminlerin karmaşık yapılarından dolayı mekanik özelliklerinin belirlenmesi oldukça zordur. Farklı koşul ve ortamlardaki zeminlerin gerilme-gerinim davranışları, geliştirilen matematiksel bünye modellerine göre tanımlanabilmektedir. Çalışma kapsamında Lineer elastik model ve Mohr Coulomb bünye modellerine değinilmiştir. Bu modellerden başka hiperbolik modeller (Koedner, 1963; Duncan-Chan, 1971), Hardening Soil model (Schanz, 1996), Cam clay modeller Cam Clay, Modifiye Cam Clay, Soft Soil model ve diğer modeller (Lade, 1977; Sekiguchi-Ohda, 1977) araştırmacılar tarafından ortaya konmuştur.

2.2.1 Lineer Elastik Model

Mühendislik yapılarının çoğunda gerilme-şekil değiştirme diyagramının yalnızca doğru kısmına denk gelen, izafi olarak küçük deformasyonlara göre tasarım yapılır. Diyagramın doğrusala yakın bu kısmında gerilme, şekil değiştirme ile doğrusal orantılıdır (Denklem 2).

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2)$$

Bu bağıntı İngiliz matematikçi Robert Hooke tarafından (1635-1703) ortaya konmuştur ve

adıyla Hooke kanunu olarak anılır. E katsayısı malzemenin elastik modülü olarak veya İngiliz bilim adamı Thomas Young'a (1773-1829) izafeten Young modülü olarak bilinmektedir.

Hooke kanununun uygulanabileceği maksimum gerilme değeri malzemenin orantı sınırı olarak bilinir. Elastik davranışın son bulduğu sünek malzemelerde Hooke kanununun son bulduğu orantı sınırıyla akma noktası çakışır. Diyagramda akma noktasından sonraki kısımlara ait ilişkinin doğrusal olarak ifade edilmesi zor olduğundan orantı sınırı kolayca tanımlanamaz. Fakat böyle malzemelerde orantı sınırını çok aşmayan gerilmeler malzemede önemli bir hataya sebep olmaz.

İzotropik elastik Hooke kanunu lineer elastik modelin temellerini oluşturmuştur. Malzeme mühendisliğinde sıklıkla başvuru yapılan modellerdendir. Elastisite modülü, E ve Poisson oranı, ν olmak üzere iki temel parametre ile temsil edilir. Fakat ayrık malzemeler topluluğu olan zemini izotropik kabul etmek, plastik davranış sergilemeksizin deformasyonların elastik sınırlarda kalacağını kabul etmekle eşdeğer olacağı için yanlıştır. Ancak bu malzeme modeli zemin ve kaya içerisindeki büyük beton yapıların modellenmesinde kullanılmaktadır. Lineer elastik modelde gerilmeler hiçbir şekilde kısıtlanmadığından malzemede sonsuz rijitlik davranışı gösterme durumu oluşur. Zeminin gerçeğin dışında davranış sergilemesi modeli kullanılmaz kılınmaktadır (Beer ve Johnston, 2011).

2.2.2 Mohr Coulomb Model

Zeminlerde kayma direncinin matematiksel bir ifade ile gösterimi 1776 yılında Coulomb ve Tresca (1869) ile başlamıştır. Coulomb genel kayma hipotezine göre zemin bünyesindeki herhangi bir düzlem üzerinde normal gerilme ile kayma gerilmesi arasında (Denklemler 3),

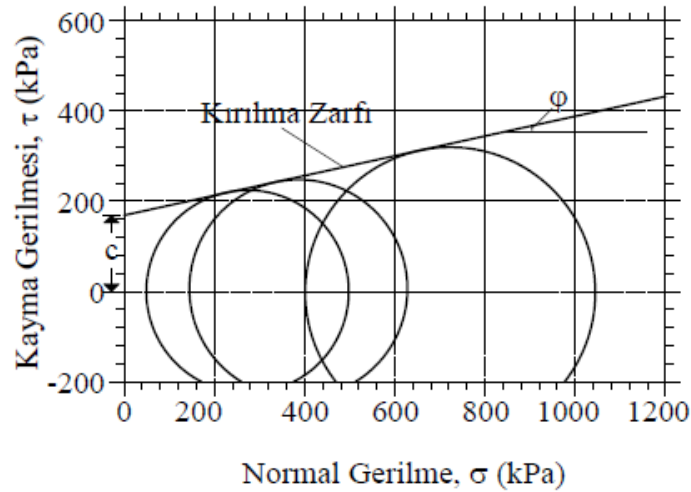
$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (3)$$

bağıntısı varsa, o düzlem üzerinde kırılmaya varılmış demektir. Denklemlerde c kohezyon, ϕ kayma mukavemeti açısı, τ_f kayma direncini ve σ normal gerilmeyi temsil etmektedir.

Zeminler için bugün kullandığımız ilk geçerli göçme hipotezi Mohr (1911) tarafından

geliştirilmiştir. Yıllar içerisinde birçok göçme hipotezi ortaya konmuştur. Bu hipotezler arasında en yaygın olarak kullanılanı Mohr – Coulomb göçme hipotezidir. Hipoteze göre zeminin kayma mukavemeti Coulomb sürtünme yasasına dayanır. Bu yasa birbiri üzerinde kaydırılmaya çalışılan iki bloğun harekete geçmesi için uygulanan kuvvetin sürtünme kuvvetini yenmesini esas alır. Mohr hipotezi zamanla Coulomb'un yatay bağıntısıyla birleştirilerek günümüzdeki Mohr – Coulomb göçme hipotezi oluşturulmuştur.

Mohr – Coulomb göçme hipotezine göre zeminin kayma mukavemeti Şekil 2.5'te gösterilen kırılma zarfı ile temsil edilmektedir. Bu grafikte dikey eksen kayma gerilmelerini, yatay eksen normal gerilmeleri gösterir. Kırılma zarfının altında kalan alanda göçme gerçekleşmezken kırılma zarfına teğet veya zarfın üzerindeki alanda göçme durumunun meydana geldiği kabul edilir. Kırılma zarfına ait matematiksel gösterimi 3 numaralı denklemde verilmiştir. Kayma mukavemeti parametreleri belirli zeminler için sabit olmayıp deney sırasında hakim olan yükleme, drenaj koşullarına ve deney numunesinin su muhtevası, gerilme tarihçesi, vb. göre değişiklikler gösterebilirler (Özaydın, 2011).



Şekil 2.5: Mohr gerilme daireleri ve kırılma zarfı (Genç, 2011).

2.3 Killerin Kayma Direnci

Kohezyonlu zeminlerin kayma mukavemetinin arazi koşullarına altında geçerli olacak şekilde tespiti kum zeminlere göre daha karmaşık ve zor bir problemdir. Kil zeminin suya doygunluğu, başlangıç gerilme durumu ve gerilme tarihçesi ile kayma gerilmesinin oluşması esnasındaki geçerli yükleme ve drenaj koşulları kayma mukavemetini dolayısıyla parametrelerini (c , ϕ) etkilemektedir. Kil tabakalarının kayma direnci araştırılırken bu faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekir. Arazideki tabakaların durumunu yansıtmayan numunelerin uygulamada problemlere sebep olma ihtimali yüksek olmaktadır (Özaydın, 2011).

Killerin kayma direnci normal konsolide ve aşırı konsolide olma durumlarına göre farklılık gösterir. Boşluk suyu basınçlarının aşırı yükseldiği veya düştüğü ortamda toplam ve efektif gerilmeler arasında önemli farklar oluşur. Bu nedenle kayma direncinin toplam ve efektif gerilmelere göre ifade edilmesi kil zeminlerde önem taşır.

2.3.1 Normal Konsolide Killerin Kayma Direnci

Oluşumundan bugüne kadar şu an aldığı gerilmeden daha fazla bir gerilme almamış killer normal konsolide (NC) killer olarak anılmaktadır. Aynı zamanda yumuşak killer diye anılan bu killerin aşırı konsolidasyon oranları (OCR) 1'in altındadır. Düşük makaslama dayanımı sergilerler. Konsolide edildikleri çevre basıncında kesilen numuneler NC kil olarak tanımlanır (Genç, 2011).

2.3.1.1 Normal Konsolide Killerin Konsolidasyonsuz, Drenajsız (UU) Koşullarda Sergilediği Kayma Direnci

Bir yapı temelini hızlı bir şekilde inşaatı veya hızla yapılan dolgu, normal konsolide killer üzerinde UU koşulunu ifade eder. Yapı temelini ön konsolidasyona izin verilmeksizin yapılması gerilmedeki ani artışlara sebep olur. Bu artışla birlikte artan boşluk suyu basıncının kütle bünyesinde kalması kayma gerilmesinde ani yenilmelere sebep olabilir. Ani bir yüklemenin söz konusu olduğu NC killerde problemlerin çözümünün toplam gerilmeler baz alınarak yapılması uygun olur. Deviator gerilmedeki artışlar boşluk suyu basıncı ile karşılanır. Dolayısıyla drenajsız kayma mukavemeti çevre basıncından bağımsız olur ve

içsel sürtünme açısı 0° olur. Yumuşak killer fiziksel/mekanik özellik olan gerçek kohezyona sahip değildir, UU sonucunda tespit edilen kohezyon deneyin yorumlanmasından ibarettir.

Skempton (1957) S_u / σ_o' oranının plastisite indisi ile arttığını $I_p > 10$ için ± 0.05 yaklaşıklık ile tespit edildiğini (Denklem 4) ortaya koymuştur. S_u / σ_o' likit limit türünden $w_L > 0.40$ için ± 0.10 yaklaşıklık ile denklem ile ifade edilmektedir.

$$S_u / \sigma_o' = 0.11 + 0.0037 I_p \quad (4)$$

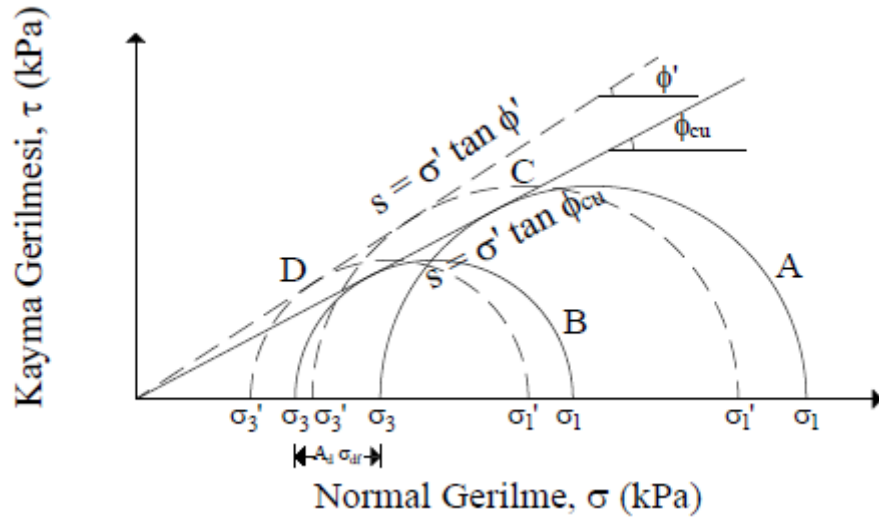
$$S_u / \sigma_o' = 0.45 W_L \quad (5)$$

2.3.1.2 Normal Konsolide Killerin Konsolidasyonlu, Drenajsız (CU) Koşullarda Sergilediği Kayma Direnci

Yumuşak killerde arazi koşullarına en yakın deney konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç deneyi (CU) ile gerçekleştirilir. Numune arazideki çevre basıncına yakın gerilmelere maruz bırakılarak boşluk suyu basınçlarının sönmelenmesi ya da su içeriğinin belli bir düzeye inmesi sağlanarak konsolide edilir. Kesme aşamasında drenaja izin verilmeyerek deviatör gerilme arttırılır. Bunun neticesinde numune bünyesinde boşluk suyu basıncı gelişir. Doygun olmayan killerde boşluk suyu basıncındaki oluşabilecek hataların telafisi için deneylerin 500 kPa ya da üzerindeki çevre basınçlarında yapılması tavsiye edilir. Boşluk suyu basıncı parametresi olarak tanımlanan A yumuşak killerde kırılma anında 0.7 ile 1.0 arasında değişir (Denklem 6).

$$A = u/\Delta\sigma \quad (6)$$

Yumuşak kil üzerinde yapılan CU deneyleri sonuçlarına göre toplam efektif gerilmelere ait Mohr daireleri ve kırılma zarfları Şekil 2.6'da verilmiştir. A ve B daireleri toplam, C ve D daireleri efektif gerilmelere göre çizilmiştir.



Şekil 2.6: Yumuşak killere ait CU deney sonucu (Das, 2007).

Kayma direnci toplam ve efektif gerime türünden sırasıyla 7 ve 8 denklemlerinde verildiği gibi tarif edilir. Örselenmemiş yumuşak killerde efektif gerilme durumuna ait içsel sürtünme açısının 25° - 39° arasında yer aldığı, plastisite indisi ile aralarında (Denklem 9) bağıntı vardır. Buna karşılık kayma direnci ile efektif gerilme arasındaki ilişkinin plastisite indisinden bağımsız olduğu görüşü de savunulur (Denklem 10). Yumuşak killerin konsolidasyonlu drenajsız içsel sürtünme açısı (ϕ_{cu}) 5° - 20° arasında değişmektedir.

$$s = \tau_f = \sigma \tan \phi_{cu} \quad (7)$$

$$s = \tau_f = \sigma' \tan \phi' \quad (8)$$

$$\sin \phi' = 0.814 - 0.234 \log I_p \quad (9)$$

$$S_u / \sigma_o' \approx 0.22 \quad (10)$$

2.3.1.3 Normal Konsolide Killerin Konsolidasyonlu, Drenajlı (CD) Koşullarda Sergilediği Kayma Direnci

Konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi (CD) numune bünyesinde boşluk suyu basıncı oluşturmada numunenin yenilmesinin sağlanması esasına dayanır. Yük etkisi

altında numune bünyesinde oluşan minimal basınçlar zemin tarafından sönümlendikçe deviatör gerilme arttırılır. Deney esnasında ihmal edilebilir düzeyde boşluk suyu basıncı olduğu için toplam ve efektif gerilmeler eşit kabul edilir. Kayma direnci Mohr-Coulomb eşitliği ile tariflenir (Denklem 8). Kayma direnci açısı (Denklem 11) eşitliğindeki şekliyle veya büyük asal gerilmeye göre (Denklem 12) eşitliği ile ifade edilebilir.

$$\sin \phi = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \quad (11)$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (12)$$

Çeşitli killeri üzerinde yapılan drenajlı deneyler sonucunda kayma mukavemeti açısının (ϕ_d) plastisite indisi arttıkça azaldığı tespit edilmiştir. Plastisite indisi değerinin 10 olduğu durumda kayma direnci açısı 37° - 38° değerlik alırken, 100 olduğu durumda 25° ye yakın değer aldığı tespit edilmiştir.

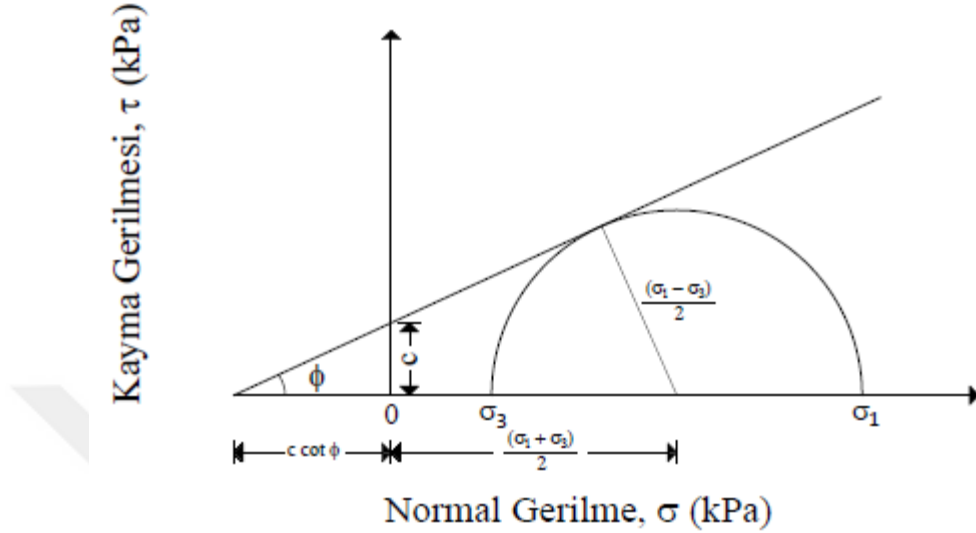
2.3.2 Aşırı Konsolide Killerin Kayma Direnci

Üst katmanların aşınma ve faylanma nedeniyle ortadan kalması veya buzul yüklerinin eriyerek ortadan kalkması, yer altı su seviyesindeki değişimler, artezyen basınçları, yüzeyden kuruma, bitki kökleri etkisi ile su kaybı, kılcallık gibi etkilerle oluşan boşluk suyu basıncındaki değişimler, kil yapısının yaşlanarak değişmesi, ortam sıcaklığının pH ve tuzluluk oranının değişimi, ayrışma-yıpranma, çökme, iyon değişimi gibi kimyasal değişiklikler etkisiyle oluşumu sırasında veya daha sonradan aldığı yüksek gerilmelerin düşmesi durumunda killeri aşırı konsolide (OC) olarak anılır. Bu killerde aşırı konsolidasyon oranı (OCR) 1'den büyüktür ve yüksek kayma dayanımı sergilerler. Doğal su içerikleri genellikle plastik limitin altındadır. Bu durum onların katı-sert kıvamda ve %100 doymun olmadıklarını gösterir.

2.3.2.1 Aşırı Konsolide Killerin Konsolidasyonsuz, Drenajsız (UU) Koşullarda Sergilediği Kayma Direnci

Aşırı konsolide killeri kayma mukavemetinin tespitinde genellikle kesme kutusu CU ve CD deneylerine başvurulur. Aşırı konsolide killerde kırılma zarfı kayma gerilmesi eksenini c

değerinde keser ($c \neq 0$) ve kayma direnci açısı oluşur ($\phi \neq 0$). Kırılma zarfına ait ilişkiler 13 ve 14 numaralı denklemlerde verilmiştir. Aşırı konsolide kil zeminde kırılma zarfına ait tipik ilişkiler Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7: Aşırı konsolide kil zeminde kırılma zarfına ait tipik ilişkiler (Das, 1983).

$$\sin \phi = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)/2}{c \cot \phi + (\sigma_1 + \sigma_3)/2}$$

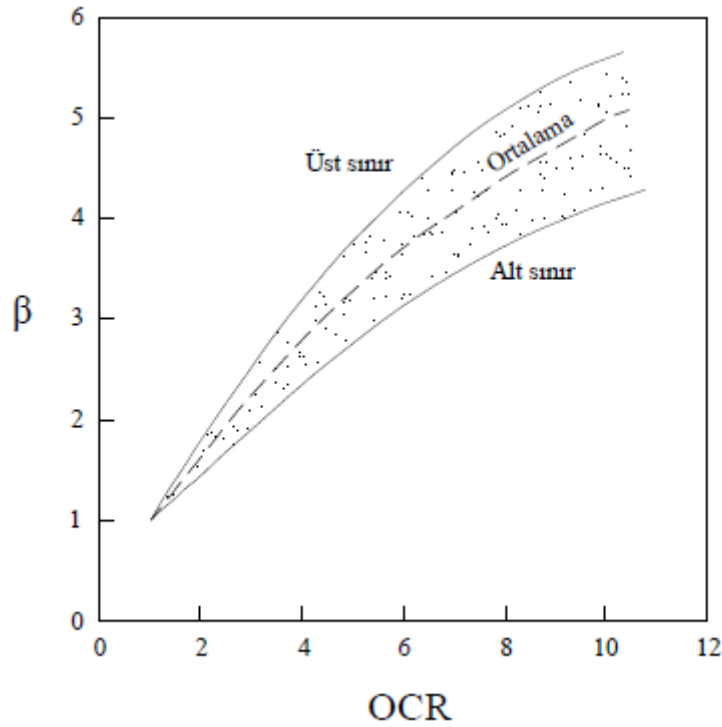
$$\sigma_1 (1 - \sin \phi) = 2c \cos \phi + \sigma_3 (1 + \sin \phi) \quad (13)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi}$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (14)$$

Aşırı konsolide killerde kayma mukavemetinin derinlikle değişimini inceleyen araştırmacılar deneysel sonuçlara dayanarak OC kil ile NC kilin S_u / σ_o' oranının OCR ile orantılı değiştiğini (Denklemler 13), boyutsuz β sayısı ile OCR ilişkisinden çizilen ortalama eğriden aşırı konsolide kilin drenajsız kayma mukavemetinin bulunabileceğini göstermiştir. β sayısı boyutsuz olup Şekil 2.8’de verilen grafik yardımıyla β sayısı ile OCR ilişkisinden çizilen ortalama eğriden OC kilin drenajsız kayma mukavemetinin bulunabileceğini göstermiştir.

$$\beta = \frac{(S_u / \sigma_o')_{OC}}{(S_u / \sigma_o')_{NC}} \quad (15)$$



Şekil 2.8: Aşırı konsolidasyon oranı ile β ilişkisi (Das, 2007).

Aşırı konsolide killerde yapılan üç eksenli deneylerde deney numunelerinin kırılma aşamalarında boşluk suyu basıncı parametresi (A_f) 0.5 – 0.7 arasında değiştiği OCR ile arasında doğrusal olmayan bir bağıntı olduğu tespit edilmiştir. Üç eksenli deney koşullarında OCR numunenin konsolide olduğu pik hücre basıncının numunenin şişmeye izin verdiği hücre basıncına oranı olarak tanımlanır (Denklem 16).

$$OCR = \sigma'_c / \sigma'_3 \quad (16)$$

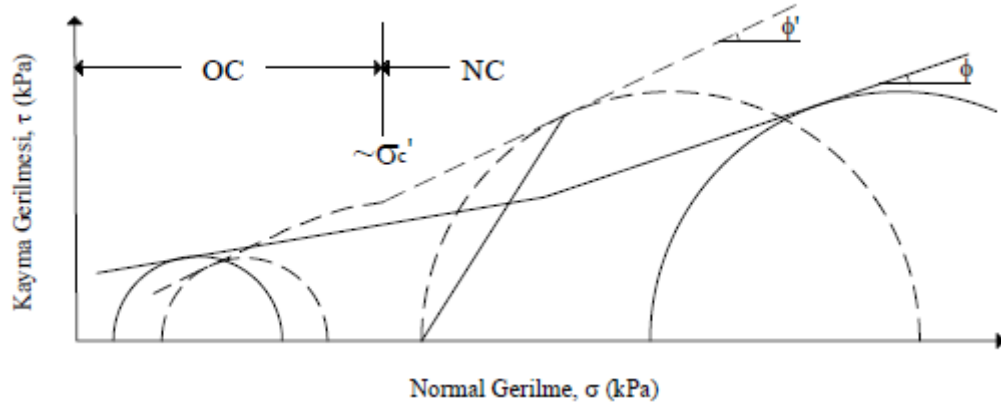
2.3.2.2 Aşırı Konsolide Killerin Konsolidasyonlu Drenajsız (CU) Koşullarda Sergilediği Kayma Direnci

Üç eksenli deneylerde uygulanan çevre basıncının aşırı konsolidasyon basıncını aşması halinde kilin normal konsolide duruma geçtiği kabul edilir. Aşırı konsolidasyon basıncının altındaki çevre basınçlarında efektif gerilme dairelerinin (NK killerin kırılma zarflarının aksine) sağ tarafa kaydıkları gözlenir. Bu durum efektif kayma direnci açısının toplam kayma direnci açısından küçük çıkmasına neden olur. Kırılma zarflarına ait efektif gerilme ve toplam gerilme bağıntıları 17, 18, 19 numaralı bağıntılarda verilmiştir. Aşırı konsolide kilde CU deney koşuluna ait kırılma zarfı Şekil 2.9'da verilmiştir.

$$(\sigma_3 < \sigma_c') \quad s = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (17)$$

$$(\sigma_3 \geq \sigma_c') \quad s = \sigma' \tan \phi' \quad (18)$$

$$S = c_{cu} + \sigma \tan \phi_{cu} \quad (19)$$

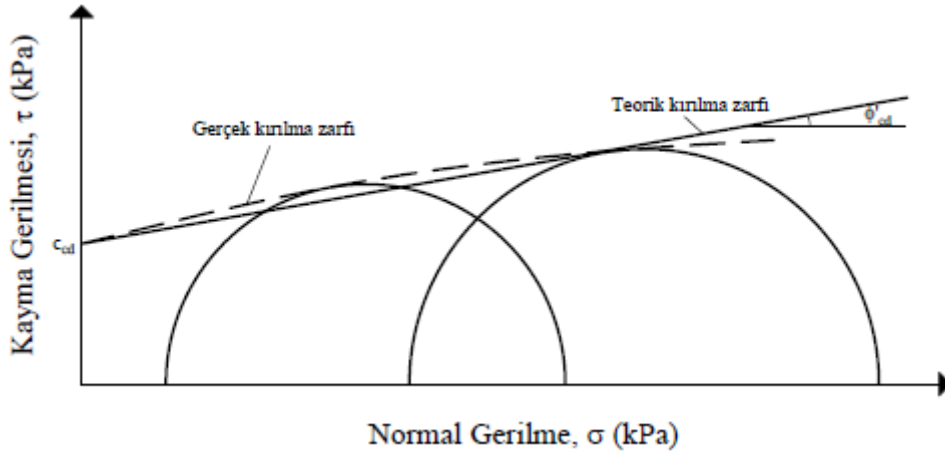


Şekil 2.9: Aşırı konsolide kilde CU deney koşuluna ait kırılma zarfı (Önalp, 2002).

2.3.2.3 Aşırı Konsolide Killerin Konsolidasyonlu, Drenajlı (CD) Koşullarda Sergilediği Kayma Direnci

Konsolidasyon ve drenaja izin verilen üç eksenli basınç deneyinde aşırı konsolide killere ait kırılma zarfı kayma gerilmesine ait eksenî sıfırdan farklı bir noktada keser ($c \neq 0$). Kayma direnci denklemi bağıntı 20 ile ifade edilir. Aşırı konsolidasyon basıncının altındaki basınçlarda kırılma zarfı eğridir (Şekil 2.10). Efektif kırılma zarfına ait parametreler arasındaki ilişkiler için 13 ve 14 numaralı bağıntılar geçerlidir.

$$S = c_{cd}' + \sigma' \tan \phi_{cd}' \quad (20)$$



Şekil 2.10: Aşırı konsolide kilde CD deney koşuluna ait teorik ve gerçek kırılma zarfı (Das, 1983).

2.3.2.4 Fissürlü Killerin Kayma Direnci

Aşırı konsolidasyonu yüksek killerin periyodik olarak ıslanma kuruma çevirimine maruz kalması, ani yük kayıpları, deprem, tektonik kuvvetler gibi çeşitli nedenlerle süreksizlikler (fissür) oluşur. Fissürlerin büyüklüğü, yoğunluğu, süreksizliği, düzenlenişi kil zeminin kayma dayanımını olumsuz yönde etkilemesine sebep olabilir. Kesme kutusu deneyinde kesme kuvvetinin fissürlere paralel etkimesi, kayma direncinde çok büyük yanılgılara sebep olabilmektedir. Bu sebeple fissürlü zeminlerde üç eksenli basınç deneyi daha sık tercih edilir. Numune boyutlarının arttırılmasıyla kayma mukavemetinde önemli kayıpların yaşandığı daha önce bu konu üzerinde çalışan araştırmacılarca belirtilmiştir.

2.3.2.5 Killerde kalıntı direnç

Aşırı konsolide kil ve fissürlü kil zeminlerin kuvvet etkisi neticesinde yenilmesi gerçekleştikten sonra kayma mukavemetlerinde %70'e varan düşüşler oluşabilir. Bu sebeple tasarımcı zemine ait kayma mukavemeti değerlerini kullanırken doruk değer yerine kalıntı direnç (residüel direnç) değerini kullanır. Zemin malzemesinin bu kırılma durumu gevreklik olarak nitelendirilir. Araştırmacılar maksimum kayma direnci (τ_p) ile kalıntı direnç (τ_r) arasındaki ilişkiyi gevreklik indisi (I_B) ile tarif etmiştir (Denklem 21).

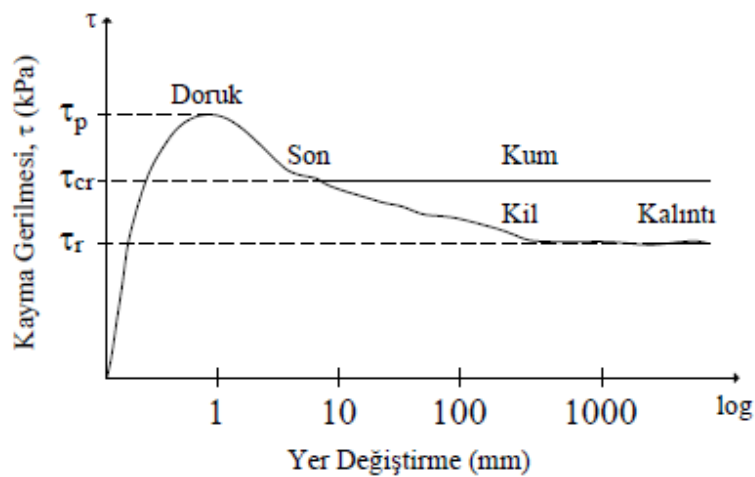
$$I_B = \frac{\tau_p - \tau_r}{\tau_r} \quad (21)$$

Maksimum kayma mukavemetini tespit etmek bir pik noktasından geçtiği için kolaydır. Genellikle en fazla %10'da kesme gerçekleşmiş olur, %10'u aştıktan sonra kritik (son) kayma direncine ulaşılır (Şekil 2.11). Bunun yanında kalıntı dirence ulaşmak için çok fazla deformasyon gerekir. Kil daneleri doruk ve son değerlerde kayma düzlemi ile bir açı halindedir. Kalıntı direnç değerini elde etmek için danelerin dar bir zon içinde zemin örneğine büyük kayma hareketi uygulaması gerekir. Bu nedenle kalıntı direnç kesme kutusuyla ve sonsuz hareket yeteneği olan halka kesme aletiyle bulunmalıdır. Kum zeminler ve kil zeminler için sırasıyla kalıntı direnç bağıntıları verilmiştir (Denklem 22, 23). Kum zeminlerde son kayma direnci ile kalıntı direnç eşit olurken kalıntı direncin killerde geçmiş gerilme koşullarından bağımsız olduğu savunulur. Birçok zeminde c_r' değeri çok düşük olduğundan genellikle sıfır kabul edilir. Kalıcı kayma direnci açısı 5° 'ye kadar düşmekle birlikte genellikle 10° - 20° arasındadır. Üç eksenli deneyler için efektif residüel kayma direnci açısı 24 numaralı bağıntı ile tarif edilir. Bu parametre yamaçların uzun süreli duraylılık analizleri için önemlidir.

$$S_r = \tau_{cr} = \tau_r \quad (22)$$

$$S_r = c_r' + \sigma' \tan \phi_r' \quad (23)$$

$$\phi_r' = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_1' + \sigma_3'} \right) \quad (24)$$



Şekil 2.11: Aşırı konsolide kilde doruk, son ve kalıcı direnç (Genç, 2011).

2.4 Killi Zeminlerde Kayma Direncinin Belirlenmesi

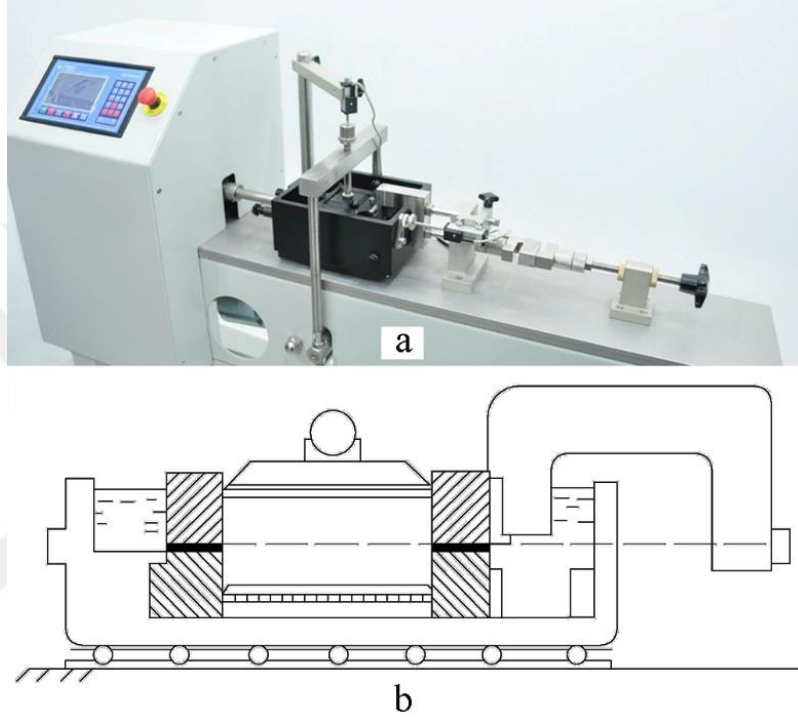
Yapıların projelendirilmesinde geoteknik etüdler büyük rol oynamaktadır. Çelik, beton, betonarme, ahşap ve nevi malzemedan inşa edilen yapıların büyük çoğunluğu doğal zemin malzemesine oturmaktadır. Bu doğrultuda mühendis doğal zemin malzemesine zemin mekaniği biliminin müsaade ettiği ölçüde araştırmalarını yaparak uygulamaya yönelik çözümler üretir. Killi zemine ait kayma mukavemeti ve kırılma zarfına ait parametreler ile ilgili birçok araştırma yapılmış olup diğer zemin endeksleriyle aralarında korelasyonlar türetilmiştir. Bu bağlamda kayma direncinin belirlenmesi kaçınılmaz olur.

Kayma direnci Basit Kesme Deneyi, Serbest Basınç Deneyi ve Üç Eksenli Basınç deneyleriyle laboratuvar ortamlarında tespit edilebilir. Sahada ise kayma direnci tespit eden deneylere başlıca Penetrasyon Deneyleri, Cep Veyn ve Cep Penetrometre Deneyleri, Arazi Veyn Deneyi, Presiyometre Deneyi, Plaka Yükleme Deneyi, Sondaj Kutusu Kesme Deneyleri sayılabilir.

2.4.1 Basit Kesme Deneyi

Fransız mühendis Alexandra Collin'in 1846 yılında yaptığı deneyler bugünkü doğrudan kesme deneyiyle benzerlik göstermektedir. Bugün laboratuvarlarda uyguladığımız Doğrudan Kesme (Basit Kesme, Kesme Kutusu) deneyi ASTM D3080 standardı ile bilinen halini almıştır. Dikdörtgen veya dairesel kesitli iki parçadan oluşan rijit bir kutunun içine yerleştirilen numune zemini konsolide etmek ve kesme kuvveti uygulanması esnasında normal gerilmeleri kontrol altında tutmak için evvela efektif gerilmelere maruz bırakılır ardından kesme kuvveti uygulanarak kayma gerilmesi yavaşça arttırılır. Bu artış yüzeyde yenilme oluşana kadar devam ettirilir. Deney üç takım efektif gerilme ve kayma dayanımı ölçümleri elde edilene kadar tekrarlanır. Verilerin grafiğe aktarılmasıyla kırılma zarfı parametreleri (c , ϕ) elde edilir. Deneyin basit ve düşük maliyetli oluşu tercih sebepleri arasında sayılabilir. Drenajın yalnızca permeabiliteyle kurulan bağıntılar kullanılarak yükleme hızını düşürmek yoluyla yapılıyor oluşu, drenajlı deney yapılmak istenildiğinde ilkel deney aletinde boşluk suyu basıncının ölçülemez oluşu, göçmeye ulaşmadan önceki gerilme seviyelerinde asal gerilme doğrultularının belirsiz olması, kırılma düzlemi boyunca gerilme dağılımının üniform olmaması (deformasyon yumuşaması gösteren zeminlerde hatalı sonuçlara sebep olabilir.) bu deneyin kısıtlayıcı yönlerini oluşturmaktadır.

Uygulamada kesme kutusu deneyi daha çok kum zeminlerin kayma mukavemetini saptamak için tercih edilir. Kum zeminler için elde edilen içsel sürtünme açısı drenajlı yükleme koşulları için geçerlidir ve bu açının arazi koşullarıyla örtüştüğü kabul edilebilir. Deney numuneleri hazırlanırken numunelerin arazideki boşluk oranına uygun olmasına ayrıca dikkat edilmesi gerekir. Basit kesme deney aletine ait görünüm ve şematik çizim Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12: a. Basit kesme deney aleti görünüm, b. deney aletine ait şematik çizim.

2.4.2 Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneyi ASTM 2166, AASHTO T208 test standartları ile kontrol edilir. Silindirik zemin numunesine eksenel bir kuvvet arttırılarak etkitilir. Zemin bu kuvvet karşısında deformasyonlar yapar, eksenel deformasyonların ve normal gerilmelerin iki eksen takımına not edilmesiyle zemin numunesine ait deney sonuçları elde edilmiş olur. Eksenel gerilmenin en büyük değeri (doruk değer) zeminin serbest basınç mukavemetini (q_u) verir. Yükleme neticesinde oluşan kayma düzlemlerinin kesişmemesi için numunenin boyu çapının en az 2 katı olarak tercih edilir. Deney basit kesme ve üç eksenli basınç deneyi gibi bir hücre içerisinde uygulanmadığı için numunelerin kendi kendilerini tutma özellikleri olması gerekir (Şekil 2.13). Bu yüzden kum zeminlerde uygulamak mümkün değildir.

Eksenel yüklemeden önce zeminin konsolide edilemediği, drenaj şartları kontrol edilemediği ve boşluk suyu basıncı herhangi bir şekilde ölçülemediği için yalnızca killi zeminlere hızlı yükleme yapmak suretiyle drenajsız kayma mukavemetlerinin tespit edildiği kabul görür. Drenajsız kayma mukavemeti 25 numaralı bağıntı ile ifade edilir.

$$\tau_f = c_u = \frac{1}{2} q_u \quad (25)$$



Şekil 2.13: Tek eksenli deney aleti.

2.4.3 Üç Eksenli Basınç Deneyi

Üç eksenli basınç deneyleri Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils'e (ASTM D2850 - 15) göre yapılmakta olup, zeminlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde arazi koşullarına en yakın yükleme ve drenaj şartlarını sağlamaları sebebiyle zemin laboratuvarlarında sıklıkla tercih edilir. Bina yapımı, dolgular, kazılar, tünel açma gibi uygulamalar zeminde farklı etkilere sebep olur. Bu etkilerin gerçekçi bir şekilde canlandırılabilmesi için numunelerdeki gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin farklı gerilme seviyeleri ve farklı drenaj şartları altında belirlenmesini sağlayan üç eksenli basınç deneyleri yapılır.

Deney numunesi bir hücre içerisine yerleştirilir numune üzerine hidrostatik basınç (su veya hava basıncı) etkitilir. Numune üzerine piston vasıtasıyla eksenel kuvvet aktarılır, numunenin yerleştirildiği alt ve üst başlık aparatlarına bağlı ince kanallar ile numunenin deney sırasındaki drenaj durumu, boşluk suyu basıncı kontrol edilebilmektedir. Üç eksenli deney aletine ait görünüm Şekil 2.14’te verilmiştir.



Şekil 2.14: Üç eksenli deney aleti.

2.4.3.1 Konsolidasyonsuz Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi (UU)

Alınan doymuş numune veya laboratuvarında hazırlanan numuneler üç eksenli deney hücresine yerleştirilip istenilen çevre basınçlarına tabi tutulur. Eksenel boy kısalma hızı, numunenin yaklaşık olarak 5-10 dakikalık bir sürede göçeceği biçimde seçilmelidir. Deney, en büyük eksenel gerilme değeri aşılsın veya birim boy kısalması %20’ye ulaşınca kadar sürdürülür (TS 1900). Yükleme hızını ayarlamanın iki yolu vardır. Sabit bir deney hızı (örneğin: 0.0125 mm/saniye) seçilir veya dakikada oluşacak deformasyon oranı belirlenir. Yapılan bu tez çalışmasında kullanılan üç eksenli deney aleti, yükleme hızını dakikada istenilen oranda deformasyon oluşturacak şekilde ayarlamakta olup bu oran dakikada %1

deformasyon oluşturacak şekilde ayarlanmıştır. Kırılma aşaması için bu bölümde yer verdiğimiz kırılma yenilme kriterleri geçerlidir. Deneyin hiçbir aşamasında drenaja izin verilmez, sonuçlar hakkında toplam gerilmeler üzerinden yorum yapılabilir. Deney sonuçları normal gerilme-şekil değiştirme grafikleri ve toplam gerilme üzerinden Mohr halkaları çizilerek kayma gerilmeleri ve kırılma zarfına ait içsel sürtünme açısı, kohezyon parametrelerinin tespiti yapılır.

2.4.3.2 Konsolidasyonlu Drenajsız  Eksenli Basınç Deneyi (CU)

Belirlenen normal gerilme ve yanal gerilmeler altında zemin numunesi konsolide edilir. Bu süreçte drenaja izin verilir süreç tamamlandığında, ters basınç hattının vanası kapatılır ve numuneye uygulanan ters basınç kaldırılır. Konsolidasyon neticesine göre basınç plakasına uygulanacak düşey yükleme hızı girilir. Kesme aşaması sırasında düşey gerilme, ereve pistonunun hareketi ile uygulanır. Deformasyon, düşey yük değerleri düzenli olarak okunur. Bu değerlerin kullanılmasıyla deviatorik gerilme ($\sigma_1 - \sigma_3$) ile boşluk suyu basıncının gerinim bazında grafikleri oluşturulur. Kırılma noktası genelde en yüksek ana gerilme farkı olarak belirlenir.  eş değer numune farklı konsolidasyon basınçlarında denenir. Yenilme noktalarına ait efektif gerilme Mohr daireleri çizilir. Böylece efektif dayanım parametreleri kohezyon ve kayma direnci açısı bulunur.

2.4.3.3 Konsolidasyonlu Drenajlı  Eksenli Basınç Deneyi (CD)

CD'de kesme aşamasında hacim değişimi lm yapılır. Bu deney, CU deneyi ile benzerlik gösterir. Ancak kesme aşamasında ters basınç hattı açık kalır. Numune düşey yükleme hızı yavaş olmalıdır. Bu şekilde boşluk suyu basıncının artması engellenir. Kesme aşamasında, drenajlı üç eksenli deney, drenajsız deneye göre 7-15 kata kadar uzun sürebilir. Kesme tamamlandıktan sonra sonuçlar ile ana gerilme farkı-hacim değişimi, gerinim bazında grafikler çizilir. Mohr halkaları çizildikten sonra kırılma/göçme doğrusu çizilip c_{cd}' ve ϕ_{cd}' bulunur.

BÖLÜM 3

MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması kapsamında, Kutlubey Yazıcılar bölgesine ait killi zemin numunelerine ağırlıkça farklı oranlarda karıştırılan Çatalağzı B Termik Santraline ait atık uçucu külleri üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneyleriyle, uçucu kül katılan kil numunelerin mukavemet değerlerindeki değişim araştırılmıştır. Bu bağlamda Tablo 3.1’de verilen deneyler verilen kür sürelerinde ilgili standartlarına uygun bir şekilde uygulanmıştır.

Tablo 3.1: Uygulanan deneyler ve uygulandıkları kür süreleri.

Deneyler	Kür Süresi				
Elek analizi deneyi	Hemen	1 Gün	8 Gün	16 Gün	32 Gün
Doğal zemin	X				
Uçucu kül	X				
Uçucu kül katkılı zemin karışımları	X				
Hidrometre deneyi	Hemen	1 Gün	8 Gün	16 Gün	32 Gün
Doğal zemin	X				
Uçucu kül	X				
Uçucu kül katkılı zemin karışımları	X				
Piknometre deneyi	Hemen	1 Gün	8 Gün	16 Gün	32 Gün
Doğal zemin	X				
Uçucu kül	X				
Uçucu kül katkılı zemin karışımları	X				
Kıvam limitleri deneyi	Hemen	1 Gün	8 Gün	16 Gün	32 Gün
Doğal zemin	X				
Uçucu kül	X				
Uçucu kül katkılı zemin karışımları	X				
Standart proktor deneyi	Hemen	1 Gün	8 Gün	16 Gün	32 Gün
Doğal zemin	X				
Uçucu kül	X				
Uçucu kül katkılı zemin karışımları	X				
Üç eksenli basınç deneyi (UU)	Hemen	1 Gün	8 Gün	16 Gün	32 Gün
Doğal zemin		X			
Uçucu kül katkılı zemin karışımları		X	X	X	X
Elektron mikroskobu deneyi (SEM)	Hemen	1 Gün	8 Gün	16 Gün	32 Gün
Doğal zemin					X
Uçucu kül					X
Uçucu kül katkılı zemin karışımları					X
X ışınımı deneyi (XRD)	Hemen	1 Gün	8 Gün	16 Gün	32 Gün
Doğal zemin					X
Uçucu kül					X
Uçucu kül katkılı zemin karışımları					X

3.1 Kutlubey Yazıcılar Bölgesi Killeri

Yapılan araştırmalarda kullanılan killi zemin numuneleri, Bartın ili Kutlubey Yazıcılar bölgesinden temin edilmiştir (Şekil 3.1). Çalışma alanına ait jeolojik formasyon incelendiğinde bu alanın iki farklı zemin biriminden oluştuğu gözlenir. Bu birimler alttan üste doğru ayrılmış Alt-Orta Eosen yaşlı Çaycuma formasyonu ve Kuvarterner yaşlı alüvyal akarsu çökelleridir. Çalışma alanının büyük kısmını oluşturan Çaycuma Formasyonu, genel olarak üst seviyelerde açık kahverengi, sarımsı, alta doğru yeşilimsi gri renkli, orta-çok ayrılmış, zayıf-çok zayıf dayanımlı, yer yer ince kumtaşı tabakaları içeren silttaşı - kiltası ar dalanmasından oluşmaktadır. Bu çalışmada Çaycuma formasyonunun en üst kısmında yer alan, formasyonun ayrışması sonucu oluşan killi zeminler özenle seçilerek kullanılmıştır.



Şekil 3.1: Çalışma alanı yer bulduru haritaları ve çalışma alanında yer alan kil taşı birimlerinden görünüm.

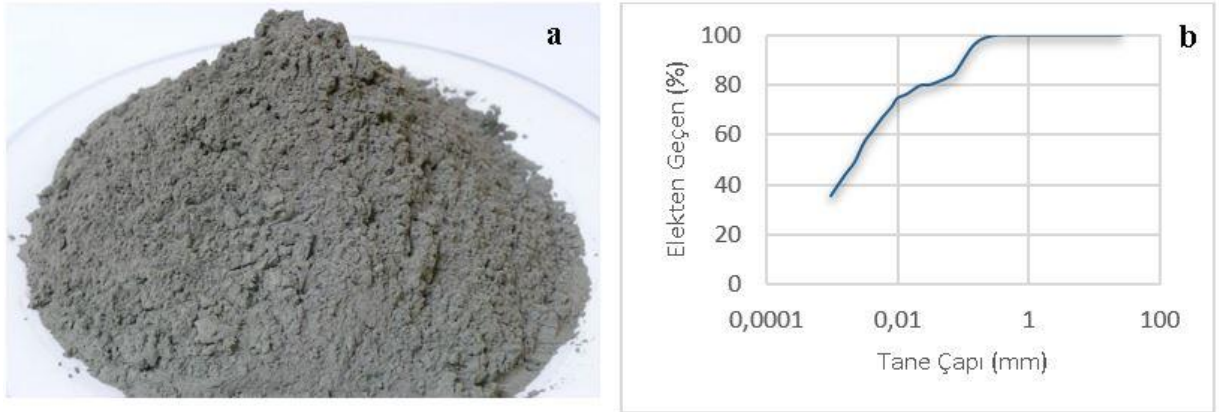
3.2 Çatalağzı Termik Santrali Uçucu Külleri

Termik santrallerde düşük kalorili taş ve/veya linyit kömürünün yüksek sıcaklıklarda yanmasıyla oluşan, baca gazlarıyla taşınan çok hafif küller (uçucu küller) mekanik veya elektrostatik yöntemlerle tutulup haznelere biriktirilir. Çatalağzı termik santralinde yaklaşık 2000 ton/gün miktarında açığa çıkan küller, kül dağları oluşturularak yer altı sularına karışmakta, sulandırılarak denize basılmaktadır. Kimyasal bileşimi, uygun

radioaktivite değerleri ve fiziksel özellikleriyle inşaat sektörünün hemen tüm alanlarında kullanım değerine sahiptir. Ani soğuma sonucu puzolanik özellik kazanan bu küller beton, killi zeminler gibi inşaatın önemli malzemelerinde kullanılmaya müsaittir.

3.2.1 Çatalağzı Termik Santrali Uçucu Küllerinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Termik santralden temin edilen uçucu kül numuneleri, kuru olarak filtrelerden toplanmıştır. Genelde küresel yapıya sahip olan uçucu küllerin dane boyutları 1-150 μm arasındadır, yumuşak bir yapıya sahiptir, koyu gri renktedir. Uçucu küller çimentodan daha ince dane yapısına sahip olmakla beraber özgül yüzeyleri daha büyüktür. Çimentodan daha düşük yoğunluğa sahiptir. İyi yanma olan termik santrallerde ihtiva ettiği karbon miktarları azalmaktadır. Kullanılan uçucu küle ait görünüm ve dane boyutu grafiği Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2: a. Çatalağzı termik santrali uçucu külüne ait resim b. Çatalağzı uçucu külüne ait dane boyutu dağılımı grafiği (Göktepe vd., 2018).

Uçucu küllerin kimyasal yapıları incelendiğinde SiO_2 (silisyum dioksit), Al_2O_3 (alüminyum oksit), Fe_2O_3 (ferrik oksit), MgO (magnezyum oksit) bileşiklerinin uçucu küllerin oksit içeriklerinin %85 veya daha fazlasını oluşturduğu tespit edilmiştir. Kullanılan kömürün cinsi ve kimyasal özellikleri, yanma sıcaklığı gibi etkenler uçucu kül bünyesini oluşturan bileşiklerin yüzdelerindeki değişimlere sebep olur. Çatalağzı termik santraline ait 5 numune üzerinde deney yapan Türker vd. oksit yüzdelerinin birbirine çok yakın olması sebebiyle santralin üniform özellikte kül ürettiğini ortaya koymuştur (Tablo3.2). Literatür çalışmaları kapsamında sunulan Tokyay’ın 1989 yılında tespit ettiği oksit yüzdeleri ile Türker’ in

sunduğu kimyasal analiz sonuçları birbirine çok yakındır.

Tablo 3.2: Çatalağzı termik santraline ait kimyasal analiz sonuçları (Türker vd., 2009).

Numune								
Oksit (%)	1 Numaralı Numune	2 Numaralı Numune	3 Numaralı Numune	4 Numaralı Numune	5 Numaralı Numune	Ortalama	St. Sapma	Varyasyon kats., (%)
SiO ₂	58.69	58.48	58.55	58.95	59.07	58.75	0.25	0.43
Al ₂ O ₃	25.10	25.34	25.48	24.94	25.36	25.24	0.22	0.87
Fe ₂ O ₃	5.80	5.77	5.66	5.81	5.74	5.76	0.06	1.05
S+A+F	89.59	89.59	89.69	89.70	90.17	89.75	-	-
CaO	1.49	1.48	1.34	1.55	1.45	1.46	0.08	5.48
MgO	2.22	2.22	2.22	2.22	2.20	2.22	0.01	0.45
SO ₃	0.12	0.12	0.10	0.03	0.05	0.08	0.04	50.00
K ₂ O	4.04	4.09	4.04	4.02	4.05	4.05	0.03	0.74
Na ₂ O	0.59	0.59	0.59	0.61	0.61	0.60	0.01	1.83
KK	1.28	1.01	1.33	1.02	0.98	1.12	0.17	15.18
Cl	0.013	0.027	0.011	0.016	0.010	0.015	0.007	50.00

3.2.2 Çatalağzı Termik Santrali Uçucu Küllerinin Sınıflandırılması

Kükürt trioksit ve serbest kireç yüzdeleri TS EN 450 standardındaki sınırlar içerisinde kalır. Çatalağzı uçucu külü, reaktif kireç miktarının ilgili yönetmelikteki verilen sınır değerden az olması nedeniyle TS EN 197-1 standardına göre V sınıfına (silissi uçucu kül) girer. Silisyum dioksit (SiO₂), alüminyum oksit (Al₂O₃), ferrik oksit (Fe₂O₃) miktarlarının toplamı %89'unu oluşturduğu ve diğer şartları da sağladığı için TS 639 standardına uymaktadır. ASTM C618 standardına göre SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ miktarlarının toplamının (S+A+F) %70'in üzerinde olması ve CaO miktarının %10'dan az olması bu külü F sınıfı (düşük kireçli uçucu kül) yapar (Tablo 3.3).

Tablo 3.3: Çatalağzı uçucu külünün kimyasal içeriği ve standart sınırları (Türker vd., 2009).

Oksit (%)	Çatalağzı Uçucu Külü	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C618	
			V	W		C sınıfı	F sınıfı
SiO ₂	58.75						
Al ₂ O ₃	25.24						
Fe ₂ O ₃	5.76						
S+A+F	89.75				> 70.00	> 70.00	> 50.00
CaO	1.46						
MgO	2.22				< 5.00		
SO ₃	0.08	< 3.00			< 5.00	< 5.00	< 5.00
K ₂ O	4.05						
Na ₂ O	0.6						
KK	1.12	< 5.00	< 5.00	< 5.00	< 10.00	< 5.00	< 6.00
Cl	0.015	< 0.10					
Serb. CaO	0.13	< 1.00					
Reak. SiO ₂	34.18	> 25.00	> 25.00	> 25.00			
Reak. CaO	0.65		< 10.00	> 10.00			

3.2.2 Çatalağzı Termik Santrali Uçucu Küllerinin Kullanıldığı Alanlar

Uçucu küllerin zemine katılmasıyla permeabiliteleri azalır dolayısıyla bünyelerindeki zararlı kimyasalların çözünüp süzülmesi engellenir. Baca gazlarına karışıp hava ile temasıyla ani soğuyan uçucu küller puzolanik özellik kazanır. Bu özellikleri nedeniyle mühendislik yapılarında yaygın kullanım alanına sahiptir. Başlıca dolgu işlerinde, temel altı dolgu, zeminde ve yollarda kimyasal stabilizatör, kireç ve asfalt enjeksiyonlarında, yalıtım malzemesi, maden ocaklarında filler, beton üretiminde reolojik özellikleri düzenleyici, çimentoda katkı, tuğla üretiminde katkı, duvar arkası geri dolgularda zemine karıştırılmak suretiyle, katı atık sahalarında geçirimsiz perde inşaatlarında bentonitli karışımlarda katkı malzemesi olarak kullanılır.

Uçucu külün dane yapısının çimentodan ince olması ve puzolanik aktivitesi çimento ve asfalt enjeksiyonlarında tercih edilme sebepleri olarak sayılabilir. Düşük plastisiteli olup donma çözünme çevrimine karşı hassastır, gece gündüz sıcaklık farklarının fazla olduğu bölgelerde kaplama malzemesi olarak kullanılması önerilmez. Çimento, kireç ve betonla karıştırılıp çok çeşitli uygulamalarda sıklıkla kullanılır. Yararlı, ucuz ve ulaşması kolay bir yan üründür.

3.3 Deneysel Çalışma Sonuçları

Kutlubey Yazıcılar bölgesinden temin edilen killi zeminler ve Çatalağzı Termik Santralinden alınan uçucu küller üzerinde birtakım deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler kür sürelerine, su içeriklerine, zemin ve uçucu kül içeriklerine göre farklılıklar göstermektedir. Bu bölüme ait diğer alt başlıklarda deneylerde kullanılan numunelerin kür süreleri, uçucu kül içerikleri vb. konular hakkında bilgilendirmeler yapılacak deney aşamaları ile ilgili olarak detaylı bilgi verilmeye çalışılacaktır.

3.3.1 Dane Boyutu Dağılımlarının Belirlenmesi

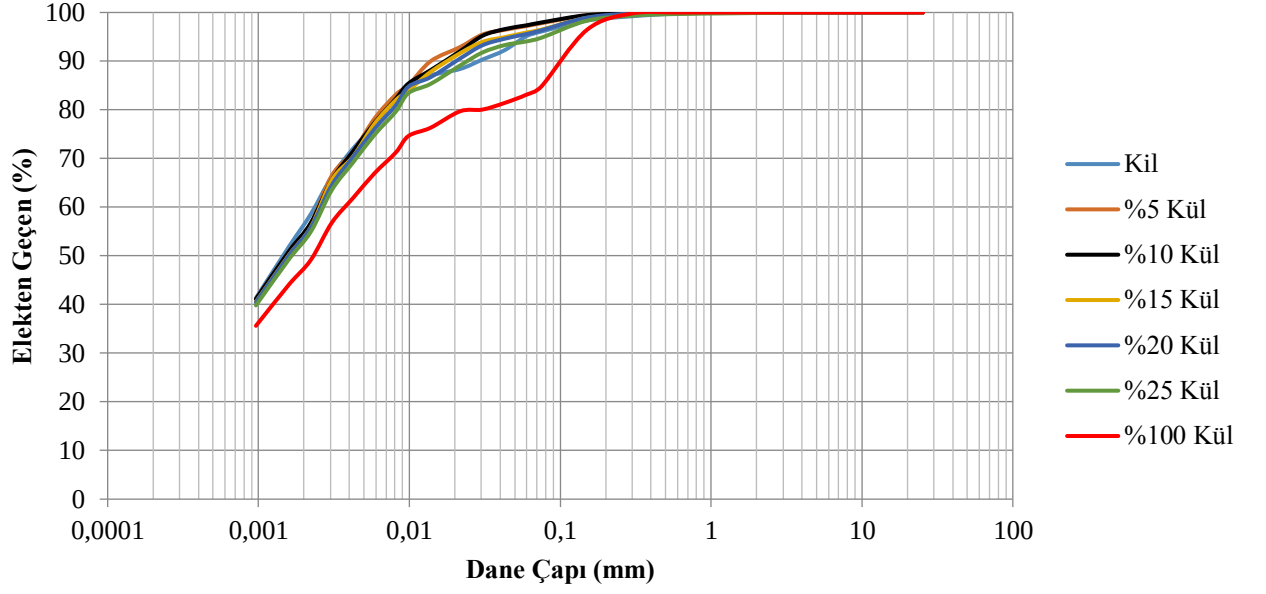
Deneyisel çalışmanın ilk aşamasında Bartın ili Kutlubey bölgesine ait killere ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 oranlarda Çatalağzı Termik Santrallerinden atık F sınıfı uçucu kül katılarak deney örnekleri hazırlanmıştır. Elde edilen uçucu kül-kil karışım örnekleri üzerinde dane boyu değişimini belirlemek amacıyla elek analizi deneyleri yapılmıştır (Göktepe vd., 2018). Burada %5 katkılı uçucu kül-kil karışımı 4750 gram killi zemine karıştırılan 250 gram uçucu külü ifade etmektedir. Kür süresi beklemeksizin oluşturulan kuru numuneler üzerinde yapılan elek analizi deney sonuçlarına göre uçucu kül, zemin ve uçucu küllü karışımlar için en büyük dane boyutu 0,3 mm olarak belirlenmiştir. Bununla beraber kil ve killi karışımların 200 numaralı (0,075 mm) elekten geçen miktarı %95 civarındayken uçucu kül katılmasıyla oran azalmış yalnız uçucu kül numunesinde ise %85 olarak tespit edilmiştir. Elek analizi deneyinden sonra ıslak elek analizi ve hidrometre deneyine geçilmiştir (Şekil 3.3). Zemin numunesi ve kül numunesinin küçük dane boyutları sebebiyle dane boyutu grafiğinin oluşturulmasında hidrometre deneyinin payı büyüktür. Hidrometre deneyi 200 numaralı elekten geçip pan üzerinde kalan numunelere yapılmaktadır (Şekil 3.4). Deneye tabi tuttuğumuz numunelerin %95'inden fazlası 200 numaralı elekten geçmiştir. Bu sebeple hidrometre deneyi yapılan deneyler arasında önemli bir yer tutmaktadır. Deney sonuçlarına göre zemin numunelerinin yaklaşık %57'si kil %40'ı silt birimlerden oluşmaktadır. Zemin numunesinin %57 gibi önemli bir bölümünün kil birimlerden oluşması, tez kapsamında kullanılan toprak malzemesinin mühendislik özelliklerinin kil birimler tarafından kontrol edildiği şeklinde değerlendirilmiştir. Elek analizi ve hidrometre deney sonuçları doğrultusunda bulunan granülometri eğrileri Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.3: Islak elek analizi deneyine ait fotoğraflar.



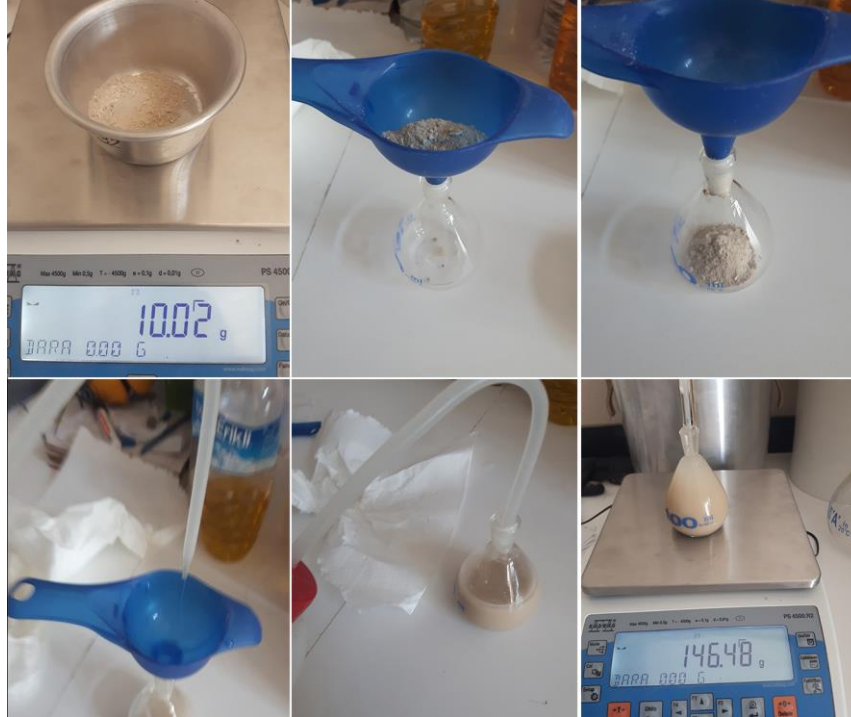
Şekil 3.4: Hidrometre deneyine ait fotoğraf.



Şekil 3.5: Dane boyutu dağılımı sonuçları (Göktepe vd., 2018).

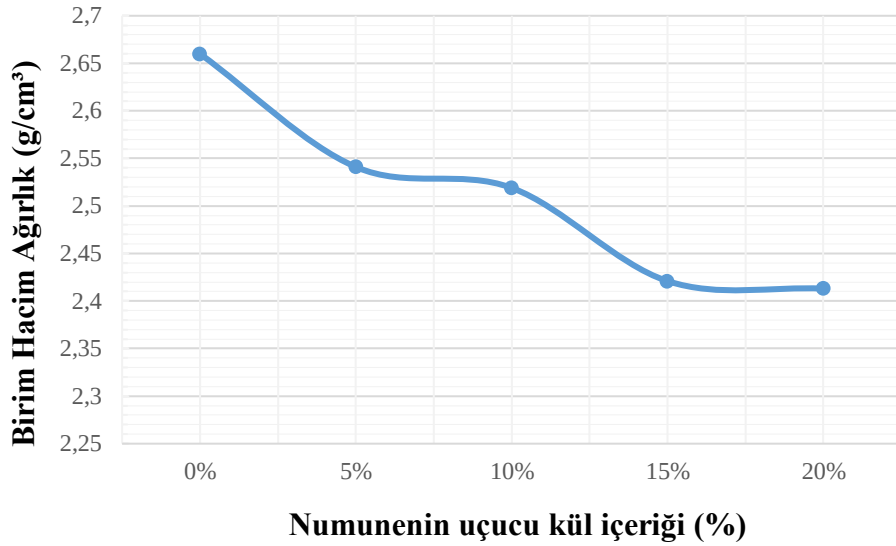
3.3.2 Özgül Ağırlık Deney Sonuçları

Deneysel çalışmanın sonraki aşmasında, numunelere ait tane birim hacim ağırlığı belirlemek amacıyla Şekil 3.6’da aşamaları gösterilen piknometre deneyi uygulanmamıştır.



Şekil 3.6: Piknometre deney görüntüleri.

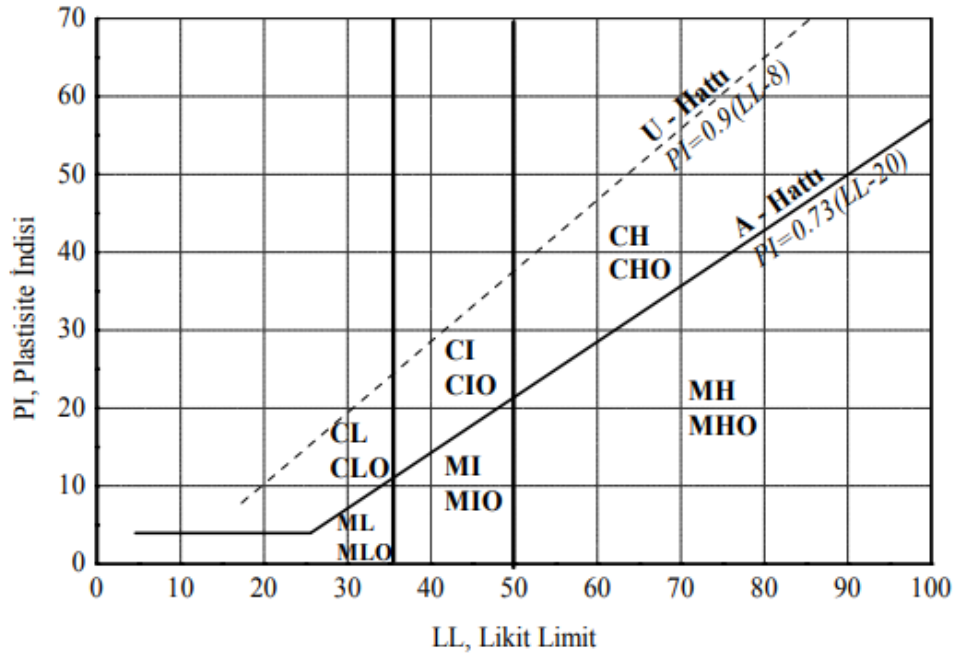
Zemin numunesi ve uçucu kül karıştırılan zemin numuneleri için yapılan deney sonuçları Şekil 3.7’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan uçucu külün birim hacim ağırlığının 2,058 g/cm³ olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte, doğal killi zeminlere uçucu kül katılmasıyla elde edilen uçucu kül-kil karışımlarının birim hacim ağırlıkları belli bir aşamaya kadar azalmış olup sonrasında ilgili değerlerde artışlar gözlemlenmiştir.



Şekil 3.7: Piknometre deney sonuçları.

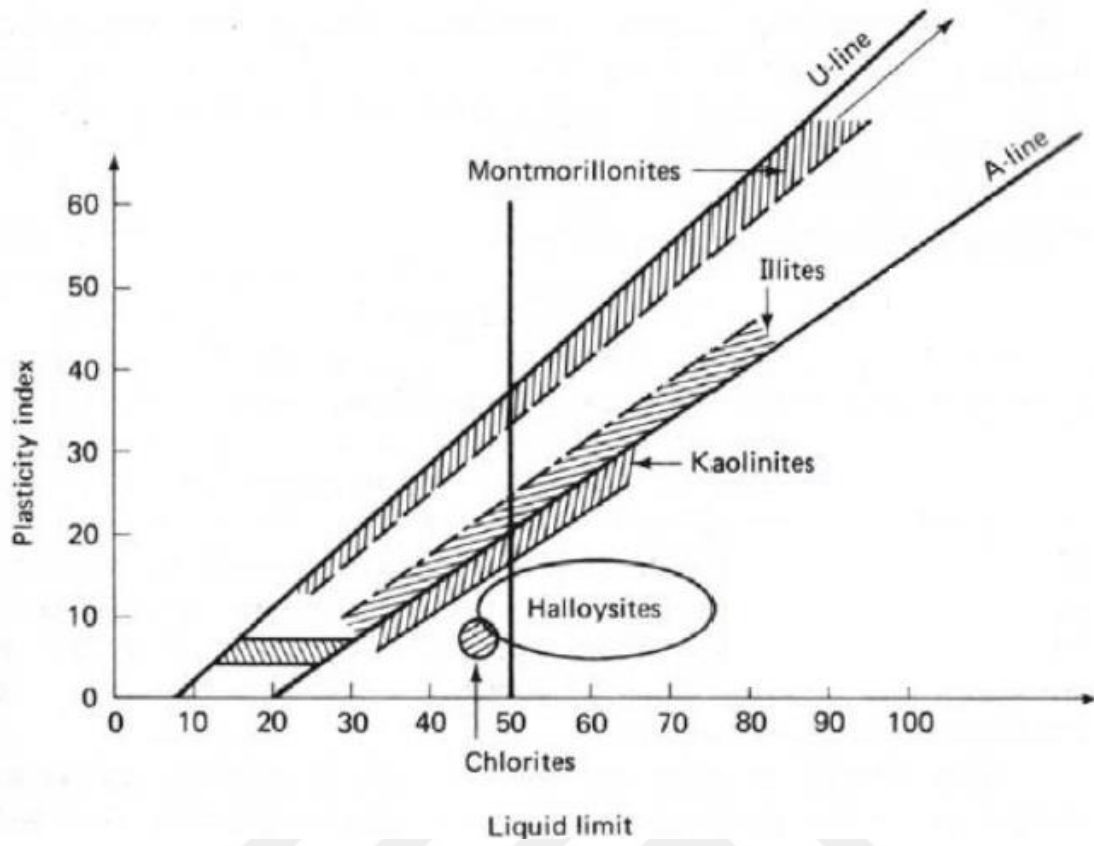
3.3.3 Kıvam Limitleri Deney Sonuçları

Ulusal ve uluslararası standartlara göre ince daneli zeminlerin sınıflandırılması Şekil 3.8’de görüldüğü üzere plastisite kartı yardımıyla yapılır. Plastisite kartı bu sınıflandırmaları kıvam limitleri deneyi sonuçları doğrultusunda yapmamıza yardımcı olmaktadır. Plastisite kartı İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması (TS 1500) yönetmeliğinden alınmıştır.

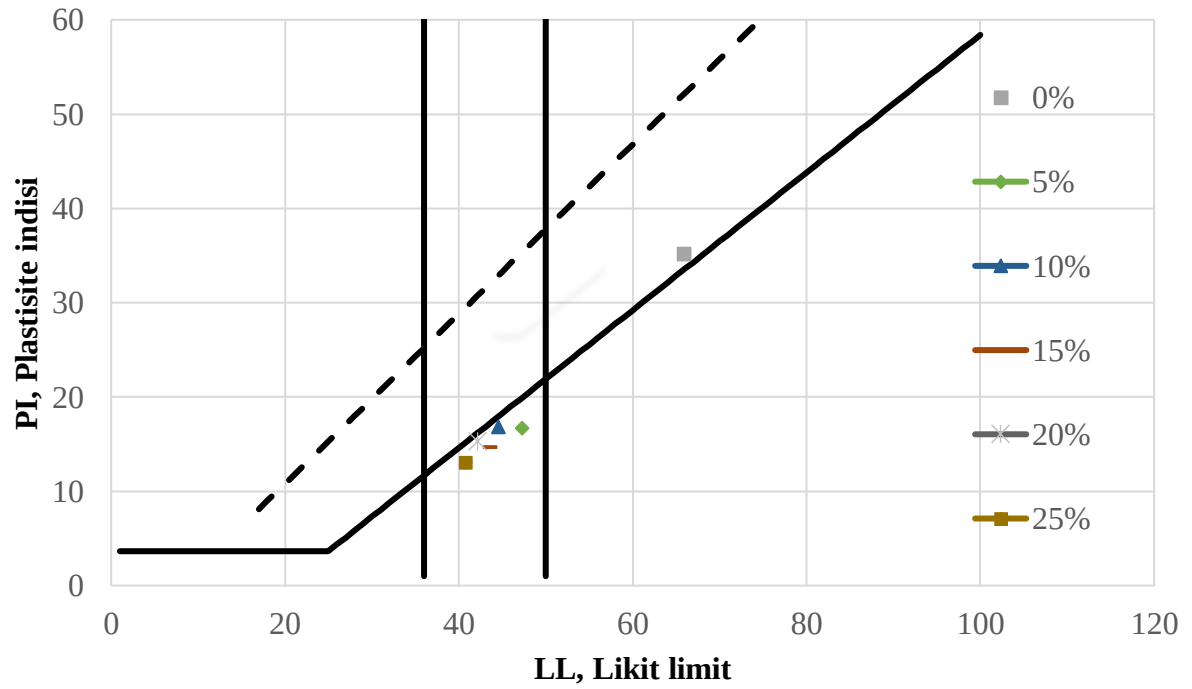


Şekil 3.8: İnce daneli zeminler için verilen plastisite kartı (TS 1500, 2000).

Numunelere ait elde edilen kıvam limiti değerlerinden deneysel çalışmada kullanılan kil örneğinin TS 1500 ve Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS) standartlarına göre CH olduğu anlaşılmıştır (Göktepe vd., 2018). Bununla birlikte, Kutlubey bölgesi killeri ile uçucu kül-kil karışımlarının plastisite kartı üzerindeki yerleri Şekil 3.10'da verilmiştir. Casagrande'nin plastisite kartına bakılarak zeminin illit birimlerden oluştuğu söylenebilir (Şekil 3.9). Zemine düşük oranda dahi uçucu kül katılması plastisite kartındaki yerinin değişmesine sebep olmuştur, %5 uçucu kül katılan numune orta plastisiteli silt olarak karşımıza çıkmaktadır. Artan oranlarda uçucu kül katılan zemin numuneleri plastisite kartında düşük plastisiteli silt durumuna doğru bir hareket sergilemektedir. Uçucu külün bünyesinde serbest halde bulunan kirecin (CaO) kil mineralleri ile etkileşimi sonucu plastisite azalır (Kurama vd., 1999).



Şekil 3.9: Plastisite kartında yaygın kil minerallerinin lokasyonları (Casagrande, 1932; geliştirilmiş veriler Mitchell; 1976).



Şekil 3.10: Numunelerin plastisite kartı üzerindeki yerleri.

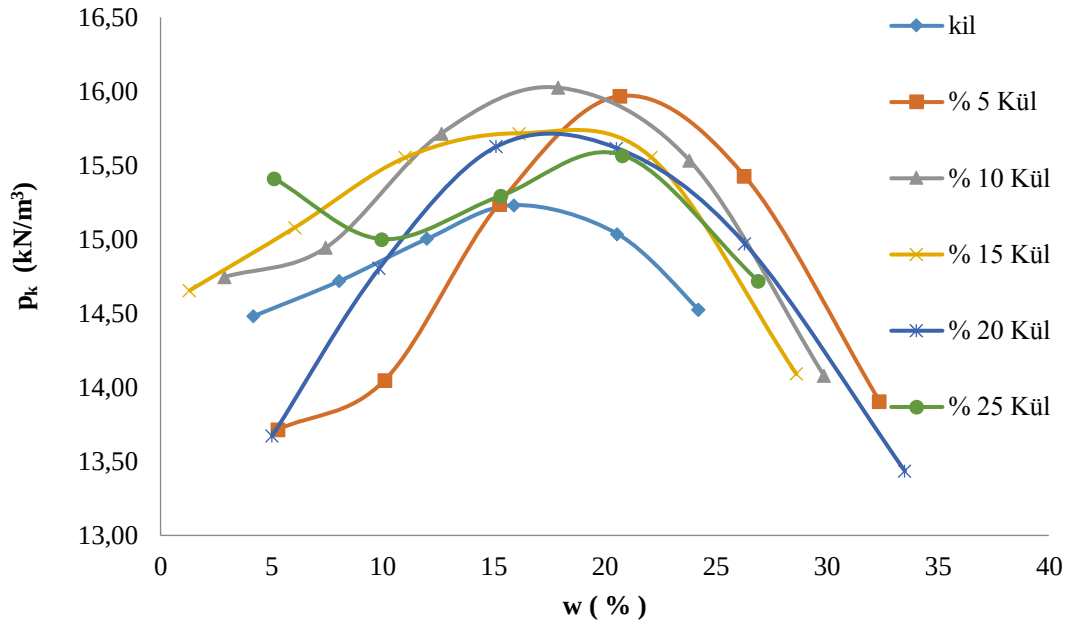
3.3.4 Standart Proktor Deney Sonuçları

Zemin ve uçucu kül katkılı zeminlerin optimum su muhtevalarını belirlemek ve diğer sıkışabilme özelliklerini incelemek üzere standart proktor deneyi yapılmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11: Standart proktor deney görüntüleri.

Standart Proktor Deneyi sonucu katkısız zemin numunesi ile uçucu kül-kil karışımlarının optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları belirlenerek Şekil 3.12’de verilmiştir (Göktepe vd., 2018). Yapılan sıkışma deneyinde zemine %10 uçucu kül eklenmesiyle en yüksek kuru birim hacim ağırlık değeri elde edilmiştir. Artan uçucu kül oranlarında kuru birim hacim ağırlık azalmıştır. Numuneler arasında en yüksek oran olan %25 uçucu kül oranı, artan uçucu kül oranının kuru birim hacim ağırlık değerlerinin azalması sebebiyle bundan sonra yapılacak deney setlerinden elenmiştir. Zemine fazla miktarda uçucu kül katılması zeminin mühendislik özelliklerinin daha fazla iyileşeceği anlamına gelmemektedir.



Şekil 3.12: Standart proktor deney eğrileri (Göktepe vd., 2018).

3.3.5 Üç Eksenli Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Kür Koşulları

Uçucu kül katılan kil numunelerin mukavemet değerlerindeki değişimi belirlemek için UU' larından elde edilecek kayma mukavemeti parametrelerinin değişimi irdelenmiştir. Deney hızının yüksek oluşu, deney numunelerinin suya doygun olmamaları ve su muhtevalarında meydana gelecek değişimlerin deneylerden alınacak sonuçları etkilemeyecek olması deney tipinin seçilmesinde etkili olmuştur. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar deneyleri TS 1900'de belirtildiği üzere bu deney örselenmemiş veya sıkıştırılmış numunelere uygulanmaktadır. Oluşturulan numunelere uçucu kül ilave edilecek olması ve diğer sebeplerden ötürü numunelerin sıkıştırılarak oluşturulması zorunlu duruma gelmiştir.

Standart proktor yöntemiyle numunelere ait optimum su içerikleri belirlendikten sonra, kül ağırlığının toplam ağırlığa (zemin ve külün toplam ağırlığı) oranı %0, %5, %10, %15, %20 olacak şekilde optimum su muhtevalarında karışımlar oluşturulmuştur. Yaklaşık 5 kg kadar karışım standart enerjiyle (305 mm'den serbestçe düşen 2,5 kg'lık tokmağın sağladığı mekanik iş) bir seferi 56 vuruş olmak üzere 3 seferde iç çapı 152,4 mm, boyu 115,5 mm olan kalıba sıkıştırılmak suretiyle yerleştirilmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13: Standart enerjiyle sıkıştırılan kalıplar.

Üç eksenli deney aletinde kullanılmak üzere 38 mm iç çapında keskin uçlu ince cidarlı örnek alıcılar, sıkıştırılmış kalıba hidrolik pres vasıtasıyla yavaşça (ezilmesine izin vermeyecek şekilde) batırılarak numunelerin ezilmesi engellenmeye çalışılmıştır. Boyu eninin en az iki katı olan silindirik numuneler proktor kalıbından dikkatli bir şekilde çıkartıldıktan sonra keskin yüzlü bir bıçak yardımıyla üst ve alt yüzeyleri tıraşlanmıştır. Hazırlanan numuneler Şekil 3.14'teki hidrolik prese yerleştirilen başlıklara oturtulup ezilmesine müsaade etmeyecek en düşük hızda silindirik kalıplardan çıkartılmıştır.



Şekil 3.14: Numune alıcıların kalıba batırılması.

Numune alıcıların kalıba batırılması sonucu elde edilen deney örnekleri streç film yardımıyla baskı oluşturmayacak ve numunenin hava alıp nemini kaybetmesine müsaade etmeyecek şekilde sarılmak suretiyle yalıtılmıştır. Numunelerin üzerlerine hangi deney setine ait oldukları, uçucu kül yüzdesi ve numune numaraları asetat kalem yardımıyla not düşülerek deney aşamasında oluşabilecek bir karışıklığın önüne geçilmeye çalışılmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15: Numunelerin kür işlemi için hazırlanması.

Bir UU deney seti 3 adet silindirik numunenin 50 kPa, 150 kPa, 400 kPa çevre basınçlarında kırılmasından oluştuğundan dolayı, deney esnasında oluşabilecek hataların telafisi düşünülerek her bir deney için 2 adet daha fazla numune elde edilmiştir. Şekil 3.15'te görüldüğü gibi yalıtılan numuneler plastik kasalara alınarak kırılma günlerine kadar $21^{\circ}\text{C} \pm 3$ sıcaklığında güneş ışığı almayacak kapalı ve rutubetli bir ortamda saklanmıştır. Deney numunelerine ait görünüm Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16: Numunelerin kür sürelerini beklemek üzere saklanması.

3.3.6. Üç Eksenli Deney Cihazının Tanıtımı ve Deney Aşamaları

Bu kısımda UU deneyin uygulama detaylarına değinilmiştir. UU deneyi için öncelikle bilgisayar hazır hale getirilir. Akış pompaları ve yükleme düzeneği açık konuma getirildikten sonra üç eksenli deney programına ait yazılım çalıştırılır. File (dosya) menüsündeki load (yükle) komutuyla, yapılacak deneye benzer bir deney dosyası yüklenir. Project (proje) penceresinde yer alan hücrelere kırımı yapılacak numuneye ait tarih açıklama vb. proje bilgileri girilir. Yazılıma ait görünüm Şekil 3.17’de verilmiştir.

The screenshot displays the TRIAXIAL software window with the title bar: TRIAXIAL - C:\Users\fatihacar\Desktop\YÜKSEK LİSANS\fatih deney dosyaları\1-%5- 150 kPa UU.dat. The menu bar includes File, View, Run, Calibrate, Control, Report, Options, and Help. The interface is divided into several tabs: Project, Saturation, Specimen, Water Content, Consolidation/B Table, Read Table, Test Parameters, Initialization, Shear Table, and Consolidation/A Table. The Project tab is active, showing a form with the following fields: Project Number (1), Project Name (1-%5 uu), Location (Bartın), Date of Test (27.02.2018), Tester (Fatih), Checker (), Description (1.gün %5 150kPa), Boring Number (), Test Number (), Sample Number (), Depth (), Elevation (), Sample Type (), and Remarks ().

Şekil 3.17: Tam otomatik üç eksenli basınç deneyi makinası yazılımına proje bilgilerinin girilmesi.

Kür süresini dolduran numuneler saklandıkları streç filmten çıkartılarak, numunelerin nem kaybına izin vermeyecek hızlı bir şekilde deney örneklerinin ağırlık, çap ve boy ölçümleri yapılmıştır. Deney süresince bir kumpas yardımıyla numunelerin boyu ve çapı 0,01 cm hassasiyetle ölçülüp not edilmiştir. Sonrasında numunelerin ağırlıkları 0,01 g hassasiyete sahip tartıyla belirlenmiş ve deney aletine ait yazılımın Specimen (numune) penceresinde yer alan ilgili hücrelere girilmiştir. Burada, numunelerin çap (initial diameter) ve boyutu (initial height) mm, ağırlığı ise kg cinsinden yazıldığı unutulmamalıdır. Aynı zamanda numuneye ait özgül ağırlığın da (specific gravity) bu kısımda belirtilmesi gerekmektedir. Numune özelliklerinin ölçülmesi ve yazılıma girilmesi Şekil 3.18-3.19’da verilmiştir.

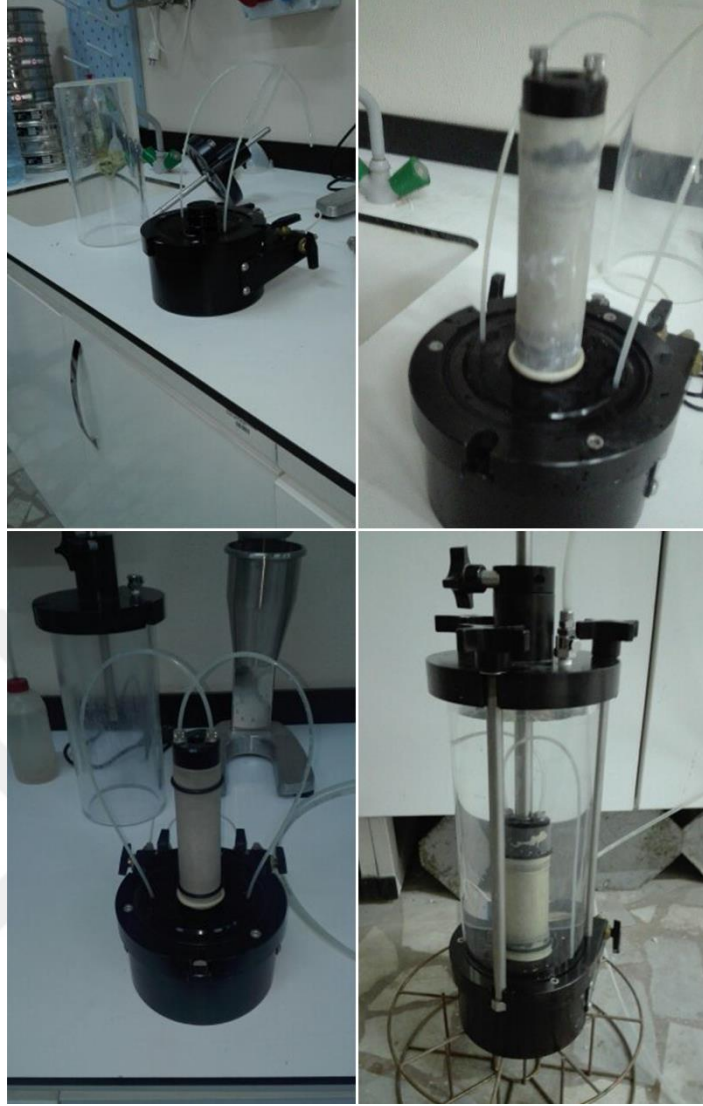


Şekil 3.18: Numunelerin çap, boy ve ağırlıklarının ölçülmesi.

Initial Diameter:	37.8	mm
Initial Height:	74.64	mm
Initial Sample Weight:	0.1569	kg
Specific Gravity:	Estimated	2.68
Plasticity:	☒ Plastic ☐ Non-Plastic ☐ Unknown	
Liquid Limit:	0.	
Plastic Limit:	0.	

Şekil 3.19: Tam otomatik üç eksenli basınç deneyi makinası yazılımına numune bilgilerinin girilmesi.

Ölçme işlemlerinin tamamlanmasından sonra numunenin deney hücresine yerleştirilmesi işlemine geçilir. Deney hücresini çevreleyen gergiler sırayla sökülür. Ardından üst kapak ve şeffaf deney hücresi sökülür. Numunenin alt ve üst kısmına filtre kâğıdı ve poroz taş yerleştirilir. Filtre kâğıdı poroz taşın gözeneklerinin kapanmaması için kullanılmakta olup zemin numunesi ile poroz taş arasına yerleştirilir. Numune alt kapak üzerinde kaçıklık oluşturmayacak şekilde konumlandırılır. Ardından üst başlık yerleştirilir. Kauçuk kılıf membran yerleştirme aparatı yardımıyla numuneyi ortalayacak şekilde yerleştirilir. Membranın boyu numunenin boyundan minimum 50 mm kadar büyük olmalıdır. Numunenin hücreyle su alışverişini kesmek için numune alt ve üst başlıkları o-ring adı verilen plastikler ile boğdurmak suretiyle kapatılır. Drenaj kontrol kanallarına ait üst başlık bağlantıları yapılırken hortumların poroz taşa temas etmemesine dikkat edilir, yaklaşık yarım santimetrelilik bir boşluk bırakılır ve bağlantı sıkılıp sabitlenir. Şeffaf deney hücresi ve hücre üst kapağı yerleştirilir. Numunenin denge durumunun bozulmaması için hücre üst kapağı yerleştirilirken kapağa bağlı yükleme çubuğunun numuneye temasından kaçınılır. Üst kapak kapatıldıktan sonra yükleme çubuğu üst başlığa temas edecek kadar yaklaştırılır. Hücre gergileri sırayla sıkılır. Deney hücresinin su ile doldurulmasına geçilir. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken husus hücreye suyun cazibesiyle alt kanal bağlantısı kullanılarak verilmesidir. İşlemler yapılırken deneyin hassasiyeti için numunenin konumunun değişmemesine özen gösterilir. Hücreye doldurulacak suyun şebekeye bağlı bir musluktan direkt olarak alınması tercih edilmez, su ağzı açık tercihen hücre hacminden fazla hacimde bir kaba alınır. Hücre kabın altında konumlandırılır, hücrenin üstünde ve altında bulunan kanallara hortumlar takılır ardından alttaki hortum su dolu kabın en derinine kadar daldırılıp yardımcı bir eleman vasıtasıyla orada sabitlenir, hortumun ezilmemesine özen gösterilir. Hücrenin üstünde yer alan kanala bağlı hortuma ters basınç yaptırılarak suyun cazibesiyle hücreyi doldurması işlemi başlatılır. Hücre içerisinde yükselen suyun hücrede hava kabarcığı bırakmaksızın doldurmasına özen gösterilir (Şekil 3.20). Üst kapağın etrafında toplanmış hava kabarcıklarının hücreyi terk etmeleri için (numuneyi sarsmayacak şekilde) hücre hafifçe sağa sola küçük açılar yaptırılır. Hücreye su veren ve hava çıkışını sağlayan hortumlar üstten başlayarak sökülür. Su ile doldurulan hücre deney aletine ait yükleme elemanına yerleştirilir. Yükleme elemanının alt çenesinde hücrenin konumlandırılmasına yardımcı daireler çizilidir dairelerin yardımıyla hücre yerleştirilir. Pistonun aşağı yönlü hareketiyle, numune üst başlığı ile piston arasında iletimi sağlayacak basınç çubuğuna 1 mm yaklaşıklıkla yaklaşması sağlanır.



Şekil 3.20: Deney hücresine numunenin yerleştirilmesi.

Deney yükleme ayarları Şekil 3.17’ de gösterilen initialization sekmesinden kontrol edilir. Genellikle başlangıç yatay ve düşey gerilmeleri eşit alınır. 50 kPa’n üzerindeki yüklemelerde gerilme oranı (Stress rate) dakikada 50 kPa, süre (duration) konsolidasyona izin vermemek için 3 dakika olarak seçilir. 50 kPa’n altındaki yüklemelerde ise gerilme oranı 10 kPa, süre yine 3 dakika olarak seçilir. Okuma tablosu (read table) için genellikle gerginlik (strain) baz alınır, numune basıncı (sample pressure) sıfır olarak alınır.

Test parametreleri (test parameters) sekmesi UU deney için Şekil 3.21’deki gibi düzenlenebilir. Membran düzeltme katsayısı gösterebilir. Program dahilinde farklı standartlara göre analiz yapmak mümkündür.

Area Correction: ☐ None
☒ Uniform
☐ Parabolic

Filter Strip Correction Factor: kPa

Membrane Correction Factor: N/mm

Start Phase: ☒ Initialization
☐ Consolidation/A
☐ Saturation
☐ Consolidation/B
☐ Shear

Test Type:

Test Standard:

Show Strength at: ☒ Maximum Shear
☐ Specified Strain

Strain: %

Şekil 3.21: Test parametreleri sekmesinden bir görünüm.

Su içeriği (water content), konsolidasyon a tablosu (consolidation/A table) kısımları boş bırakılmıştır. Okuma tablosu (read table), sturation (doyurma), konsolidasyon b tablosu (consolidation/B table) kısımları aşağıdaki şekillerde sırasıyla verilmiştir (Şekil 3.22-3.24).

	Time (min)	Strain (%)	Displacement (mm)	Volume (cc)
1	0.	0.	0.	0.
2	1.6666666666666666	0.1	0.1	0.1
3	3.3333333333333333	0.	0.	0.
4	5.e-002	0.	0.	0.
5	6.6666666666666666	0.	0.	0.
6	8.3333333333333333	0.	0.	0.
7	0.16666666666666666	0.	0.	0.
8	0.33333333333333333	0.	0.	0.
9	0.5	0.	0.	0.
10	0.75	0.	0.	0.

Şekil 3.22: Okuma tablosu sekmesinden bir görünüm.

Pressure Increment: kPa

Pressure Rate: kPa/min

Minimum Cell Pressure: kPa

Maximum Cell Pressure: kPa

Minimum Saturation Ratio:

Maximum Number of Cycles:

T1: min

T2: min

T3: min

T4: min

Read Interval: min

Şekil 3.23: Doyurma sekmesinden bir görünüm.

	Effective Horizontal Stress (kPa)	Effective Vertical Stress (kPa)	Stress Rate (kPa/min)	Duration Type	Maximum Duration (min)	Minimum Duration (min)	T100 Offset (min)	Read Table
1	0.	0.	0.	Volume	1440.	30.	0.	Time
2	0.	0.	0.	Volume	1440.	30.	0.	Time
3	0.	0.	0.	Displacement	0.	0.	0.	Time
4	0.	0.	0.	Displacement	0.	0.	0.	Time
5	0.	0.	0.	Displacement	0.	0.	0.	Time
6	0.	0.	0.	Displacement	0.	0.	0.	Time
7	0.	0.	0.	Displacement	0.	0.	0.	Time
8	0.	0.	0.	Displacement	0.	0.	0.	Time
9	0.	0.	0.	Displacement	0.	0.	0.	Time
10	0.	0.	0.	Displacement	0.	0.	0.	Time

☐ Ko Consolidation

Ko Gain: kPa/min

Ko Pressure Limit: kPa

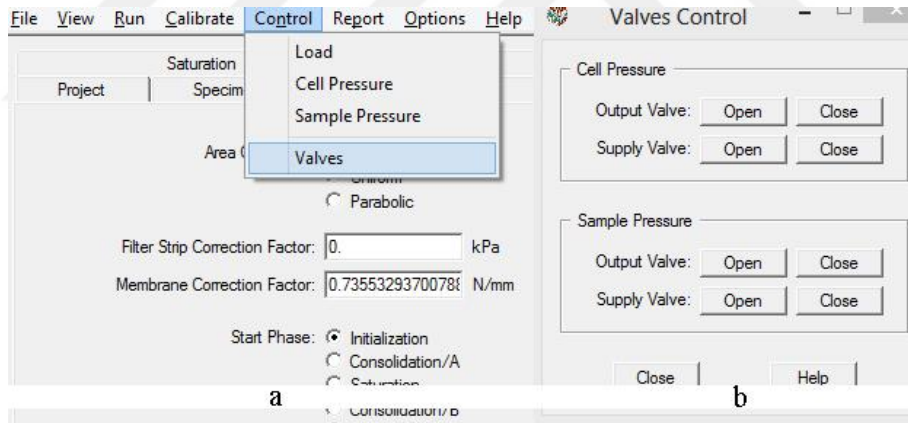
Şekil 3.24: Konsolidasyon b tablosu sekmesinden bir görünüm.

Kesme hızı olarak dakikada %1 boyuna deformasyon oluşturan hız tayin edilmiştir. %20 birim kısalmadan sonra deney sonlandırılır. Kesme tablosuna ilişkin görünüm Şekil 3.25'te verilmiştir.

	Horizontal Stress (kPa)	Vertical Stress (kPa)	Stress Type	Pore Pressure Change (kPa)	Shear Step Type	Shear Step Control	Rate (/min)	Maximum Strain (%)	Maintain Time (min)	Read Table
1	0.	7000.	Relative	0.	Undrained	Strain	1.	20.	0.	Strain
2	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
3	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
4	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
5	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
6	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
7	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
8	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
9	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
10	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time

Şekil 3.25: Kesme tablosu sekmesinden bir görünüm.

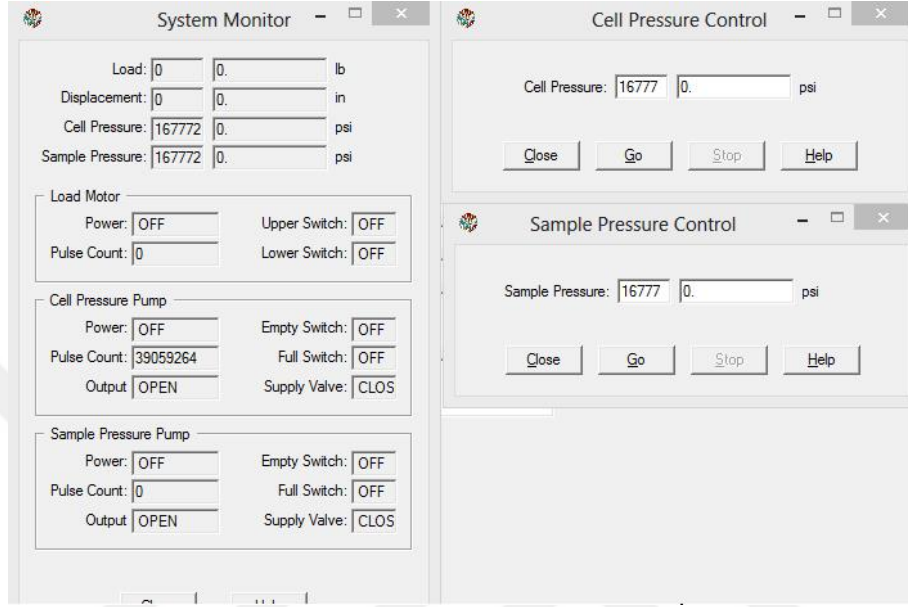
Pencerelerde yer alan değerlerin doğruluğu teyit edildikten sonra pompalara %85 doluluk seviyesinde su takviyesi yapılır. Hücre basıncını kontrol eden ve numunenin basıncını kontrol eden iki adet pompanın kalibrasyon işlemine geçilir. Kalibrasyon işlemi için iki pompanın tüm vanaları aktif hale getirilir. Kontrol (Control) kısmından vanalar (Valves) sekmesi seçilir ardından açılan vana kontrol (valves control) sekmesinden tüm vanalar açık (open) konumuna getirilir. Pompaların kontrolüne ait görünüm Şekil 3.26’da verilmiştir.



Şekil 3.26: Pompa vanalarının aktif hale getirilmesi.

Pompaların basınç farklarının kontrolü işlemine geçilir. Görüntüle (view) menüsünden sistem (system) sekmesine tıklanır, sırasıyla kontrol menüsünden hücre basıncı (cell pressure) ve numune basıncı (sample pressure) sekmeleri açılıp ilgili pompanın bağlı hortumunun ucu hücre içerisindeki deney numunesinin orta kısmında tutularak system menüsünde ilgili sekmelerde ilk sütunda yer alan değerler kontrol pencerelerindeki ilk sütundaki hücrelere yazılarak git (go) ikonuna tıklanır. Pompaların fazla basınç yüklü olduğu durumlarda hücre ve çevre basınçları kademeli olarak düşürülmesi tavsiye edilir. Kontrol işlemi yapılırken pompalara bağlı hortumların deney numunesinin orta kısmına (düşey

olarak) tekabül ediyor olması hayati önem taşımaktadır. Kontrol işleminin tamamlandığı hücre basıncı ve numune basıncına ait ilk sütunların değerlerinin sıfır olmasıyla teyit edilir. Değerler sıfırlandığında pompa hortumları hücrede bağlanması gereken vanalara bağlanır ve vanalar açılır. Pompa basınç kontrol işlemine ait görünüm Şekil 3.27’de verilmiştir.



Şekil 3.27: Pompa basınç kontrol işleminin yapılması.

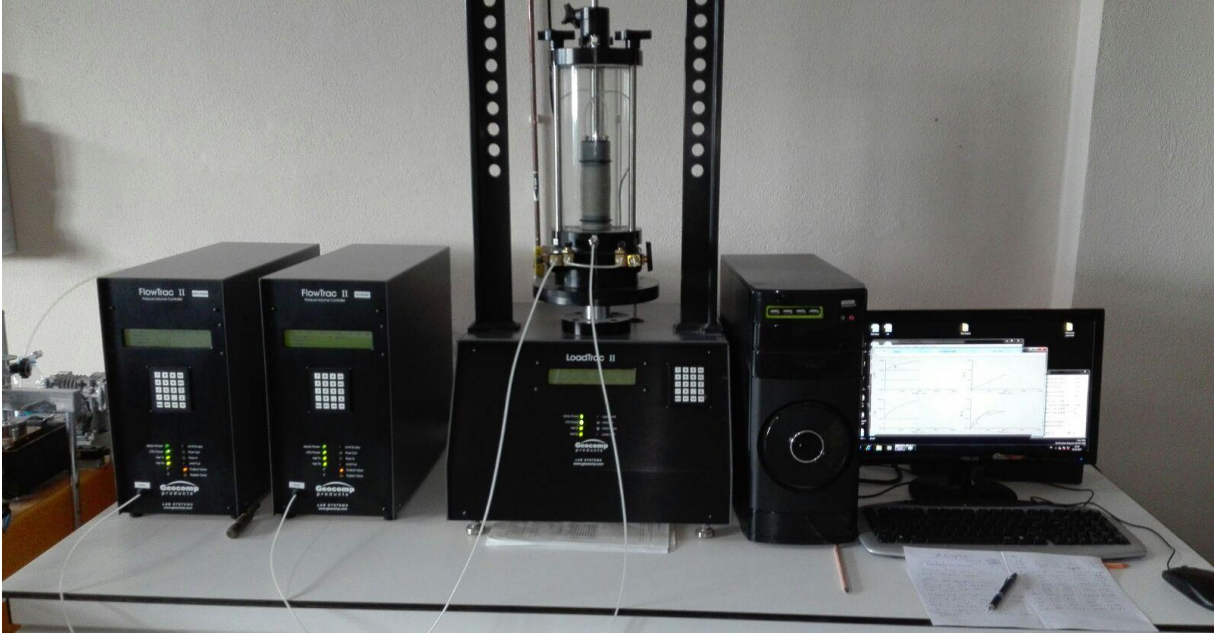
Pompa kontrollerinin de sağlanmasıyla deney hazırlık aşaması tamamlanmış olur. Çalıştır sekmesinden başlat ikonuna tıklanır. Pompaların sistem tarafından doldurulması ile alakalı gelen soru pompaların dolumu tarafımızca yapıldığı için es geçilir. Ardından pistonun altında yer alan basınç çubuğu gevşetilir ve bir sonraki aşamaya geçilir. Bu aşamada piston basınç çubuğuna kuvvet aktarana kadar yaklaşır sistem tarafından aradaki boşluk sıfıra yakınsanır. Bir sonraki aşamada üç eksenli konsolidasyonsuz drenajsız deney çevre basıncının artmasıyla 3 dakikalık bir bekleme sürecine girer. Bu aşamadan sonra deney numunesinin normal gerilme-gerinim grafiği öncelikli olmak üzere birçok grafiği otomatik olarak oluşturur. Birkaç deneyi bir arada inceleyip, Mohr daireleri oluşturularak deney setlerine ait kayma parametreleri tespit edilir. Deney sonuçları üç eksenli rapor programı kullanılarak incelenir. Program açıldıktan sonra karşılaştırılacak deney kırımlarına ait sonuçlar dosya sekmesinde yükle komutuyla çağrılır. Window penceresinde 2., 3. ve 4. ekranlara geçiş yapılarak 4 farklı deneyin dosyalarını çağırarak grafiklerini çizdirmeyi mümkün kılar.

BÖLÜM 4

BULGULAR VE TARTIŞMA

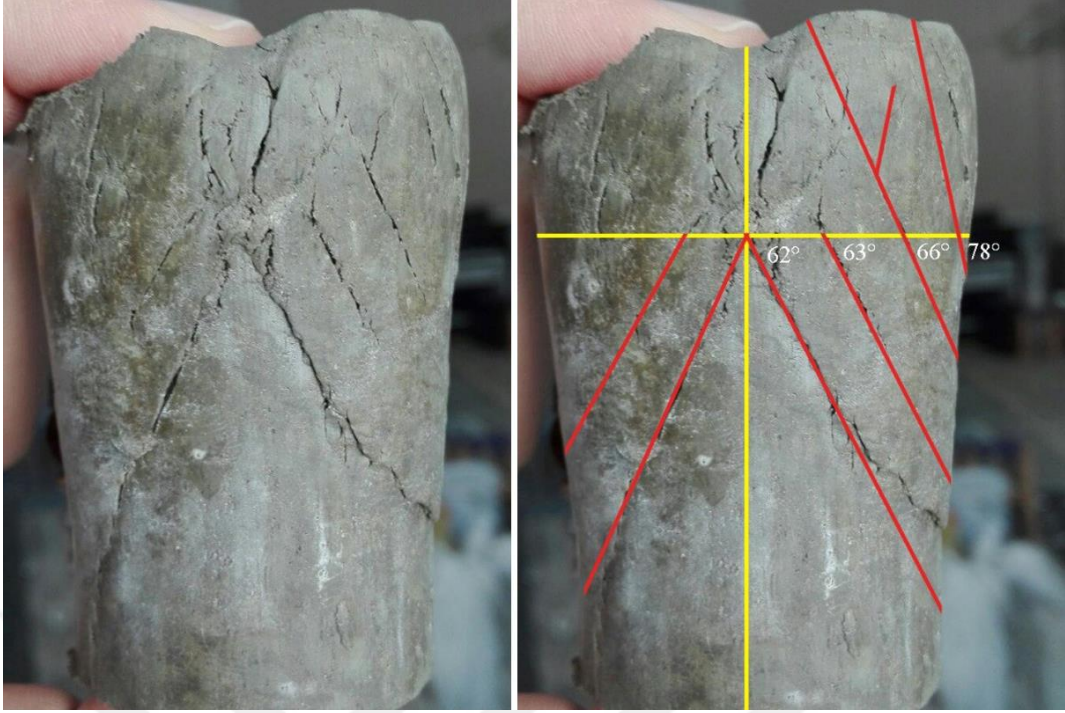
4.1. Üç Eksenli Deney (UU) Sonuçları

Tez kapsamında kullanılan tam otomatik üç eksenli deney aletinde UU koşullarda deneye tabi tutulmak üzere yedek numunelerle beraber 85 adet silindirik numune hazırlanmış olup bunlardan 55 tanesi deneye tabi tutulmuştur. Üç eksenli deney aletine ait görünüm Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1: Numunenin tam otomatik deney aletinde üç eksenli deneye tabi tutulması.

Şekil 4.2’de verildiği gibi yapılan üç eksenli deneyler sonucu numunelerde tesadüfi olmayan kırılma yüzeyleri oluştuğu kaydedilmiştir. Bununla birlikte, yüklenen numunelerde asal kırılma düzlemlerinin yanında ikincil, üçüncül düzlemler olarak ifade edilebilecek kırılma düzlemleri de oluşmuştur.



Şekil 4.2: Numunede gözlenen kayma düzlemleri.

Karışımlardaki uçucu kül miktarının artmasıyla maksimum dayanımın sergilendiği kür süreleri de artmaktadır. %5 uçucu kül katkılı karışımlarda maksimum dayanım 8 günlük kür sürelerinde sergilenirken %20 uçucu kül katkılı karışımlarda maksimum dayanımın sergilendiği kür süreleri 32 gün olarak tespit edilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda uçucu kül miktarındaki artışın reaksiyon süresini arttırdığı anlaşılmıştır.

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneyler açısından, killi zeminlere ilave edilen uçucu kül katkıları ile zemin malzemesinin kayma mukavemeti genel olarak artmıştır. Bunun yanında uçucu kül oranı %10 ve üzerinde olan karışımların kayma mukavemeti değerleri çok önemli sayılabilecek derecede bir artış göstermemiştir. Öyle ki 150 kPa çevre basıncı altında UU deneye tabi tutulan kil numune 111 kPa kayma dayanımı gösterirken, %10 uçucu kül katkılı karışıma ait numunenin 32 günlük kırım sonuçlarına göre 285 kPa kayma dayanımı sergilediği tespit edilmiştir. Bir başka deyişle kil zemine ağırlıkça %10'u oranında uçucu kül katılması kayma dayanımı değerini %156 oranında arttırırken uçucu kül oranının daha da arttırılmasıyla sonuçlar büyük oranda etkilenmemiştir. %15 ve %20 uçucu kül katkılı karışımlarda %10 uçucu kül katkılı karışımın kayma dayanımı değerlerine göre ancak $\pm 0,07$ oranında değişimler gözlenmiştir (Tablo 4.1).

Tablo 4.1: Kür Süresine ve uçucu kül yüzdesine göre farklı çevre basınçları altındaki kayma mukavemeti değerleri.

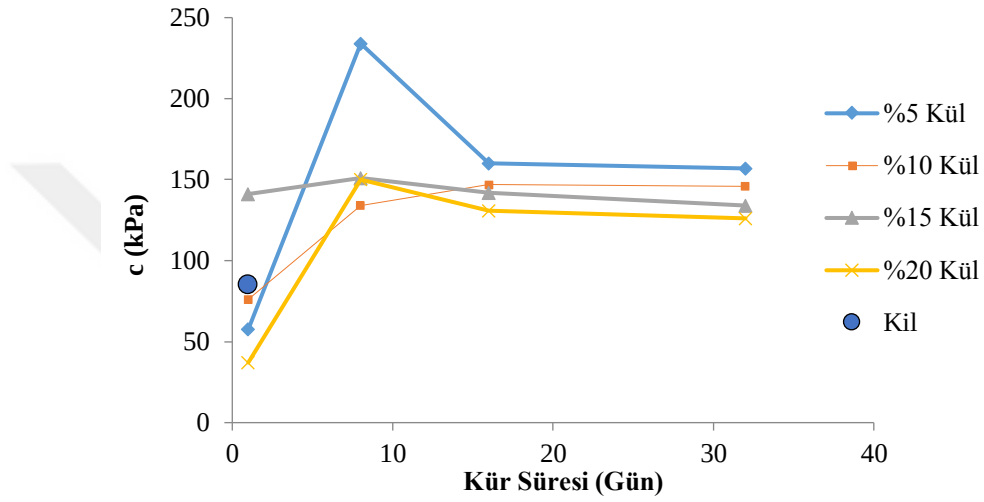
Hücre Basıncı	Kür Süresi	Uçucu Kül (%)				
		0% (kPa)	5% (kPa)	10% (kPa)	15% (kPa)	20% (kPa)
50 kPa	1 Gün	103	271	121	192	132
	8 Gün		284	270	196	174
	16 Gün		224	207	217	214
	32 Gün		194	210	197	222
150 kPa	1 Gün	111	219	230	254	214
	8 Gün		307	232	354	215
	16 Gün		237	267	253	223
	32 Gün		214	285	265	257
400 kPa	1 Gün	145	313	329	324	275
	8 Gün		352	322	371	358
	16 Gün		323	348	363	353
	32 Gün		261	369	358	414

Zemine uçucu kül katılması zeminlerin daha yüksek kayma mukavemeti ve düşük deformasyonlarda doruk değer göstermelerine sebep olmuştur. Katkılı numunelerde ise düşük kür sürelerinde doruk değere düşük deformasyonlarda ulaşılırken kür sürelerinin artmasıyla zemin bünyesindeki kimyasal reaksiyonların da etkisiyle doruk değer in yakalandığı deformasyon değerleri artış göstermiştir (Tablo 4.2).

Tablo 4.2: Kür Süresine ve uçucu kül yüzdesine göre farklı çevre basınçları altındaki kırılma yüzdeleri.

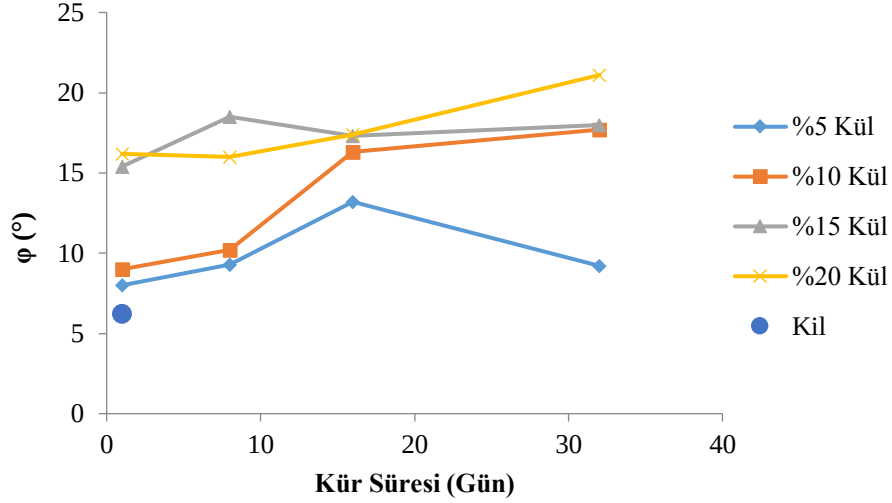
Hücre Basıncı	Kür Süresi	Uçucu Kül (%)				
		0% (%)	5% (%)	10% (%)	15% (%)	20% (%)
50 kPa	1 Gün	16.3	3.8	8.8	6.1	4.8
	8 Gün		3.9	2.7	4	4.91
	16 Gün		5	4.2	3.7	4
	32 Gün		4	6	3.8	3.91
150 kPa	1 Gün	20	8.6	6.5	7.7	6.41
	8 Gün		5.51	4.8	5.1	7.6
	16 Gün		6	5.7	4.9	7.61
	32 Gün		7.7	5.3	5.2	5.61
400 kPa	1 Gün	20	14.2	12.5	10.8	18.2
	8 Gün		9.7	15.7	9.9	9.9
	16 Gün		12.1	14.1	9.3	10
	32 Gün		15.7	10.1	12.1	12.8

Üç eksenli basınç deneyi aletiyle 50 kPa, 150 kPa, 400 kPa çevre basınçları altında test edilen numunelerin mukayeseli kırılma zarfları programa ait yazılım ile çizdirilmiştir. Kırılma zarfı parametreleri olan kohezyon ve kayma direnci açısı yapılan uçucu kül ilavesiyle genel olarak artış göstermiştir. Uçucu külün zeminin mukavemetine kür süresine bağlı olarak etkisini gösteren uçucu kül-kil karışımlarına ait UU deney sonuçları Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiştir. Farklı miktarlarda kohezyon değerlerinde elde edilen maksimum artış %174 ile gerçekleşirken, ortalama %70'lik bir artış söz konusudur.



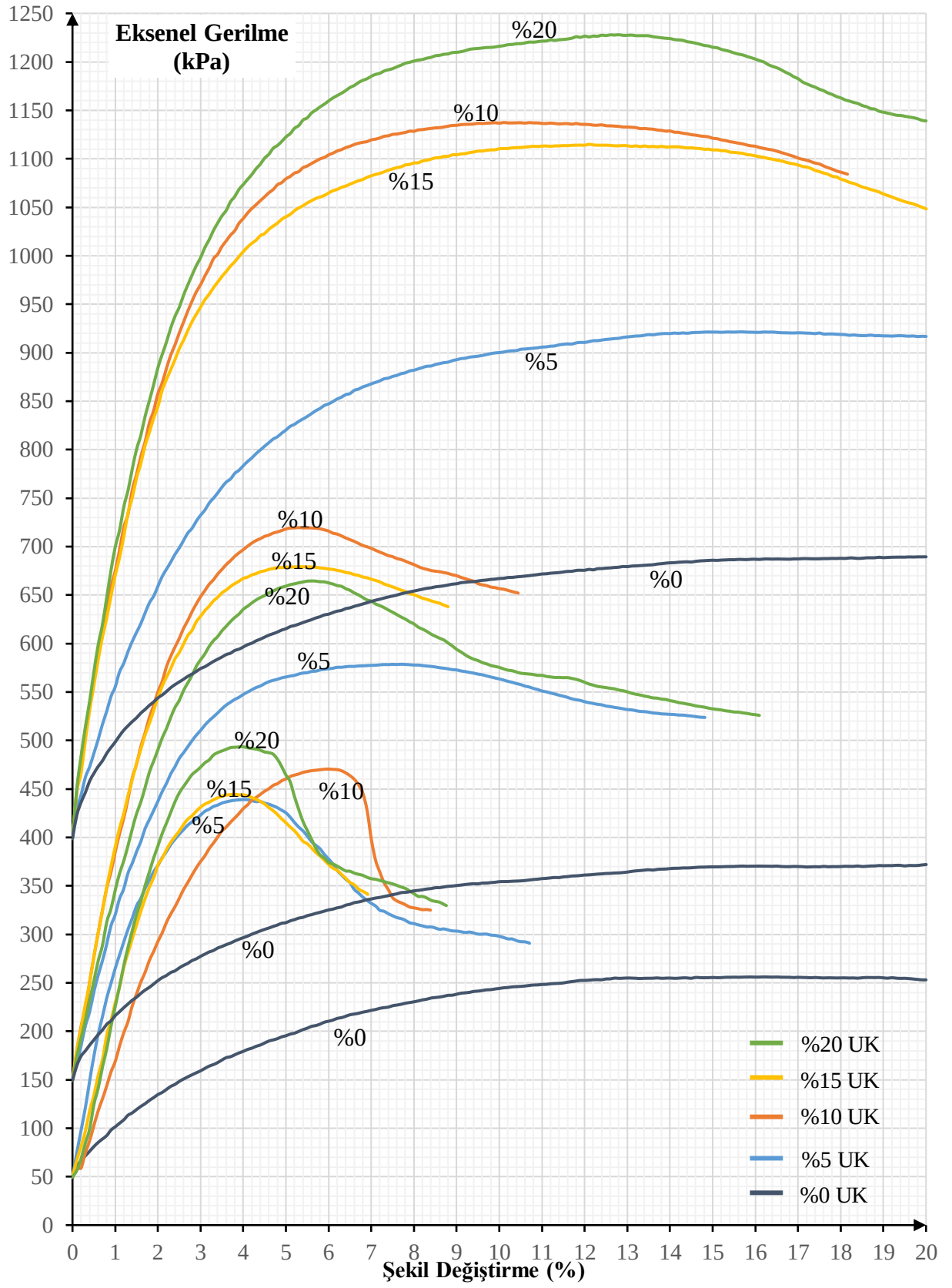
Şekil 4.3: Kohezyon değerlerinde gözlenen değişimler.

İçsel sürtünme açısı değerleri artan kür süresi ve uçucu kül oranlarıyla doğrusal olarak değişmiş ve bu artış ortalama 10° olarak gözlenmiştir (Şekil 4.4). Kayma direnci açısı ve kohezyon parametreleri artan uçucu kül oranları ve artan kür sürelerinde incelendiğinde killi zeminlere %10 uçucu kül katkısının ilavesi her iki kayma mukavemeti parametresinde de önemli oranda artışlar oluşturmıştır. 16 ve 32 günlük kür sürelerinde ortalama olarak kayma direnci açısı 11° artış gösterirken kohezyon %72 artış göstermiştir.



Şekil 4.4: Kayma direnci açısında gözlenen değişimler.

Uçucu külün zeminin mukavemetine etkisini ve özellikle bu etkinin kür süresine bağlı olarak değişimini özetleyen uçucu kül-kil karışımlarına ait 1, 8, 16 ve 32 gün kür sürelerinde ve 50 kPa, 150 kPa, 400 kPa çevre basınçları altında gerçekleştirilen üç eksenli basınç deney sonuçları ise Şekil 4.5’de verilmiştir. Elde edilen üç eksenli deney sonuçlarına göre uçucu kül katılan kil numunelerin mukavemet değerlerinde önemli oranda artışlar gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, uçucu kül-kil karışımlarının kayma dayanımında genel olarak kür süresine bağlı artışlar gözlemlenmiştir. Ancak deneysel olarak araştırılan farklı oranlardaki uçucu kül ilavelerinde tüm kür süreleri için karışımların mukavemet değerlerinde artış gözlemlenmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5: 32 gün kürde bekletilmiş karışımların Eksenel gerilme - Şekil değişirme eğrileri.

4.3. X ışını kırınımı (XRD) analiz sonuçları

Optik mineraloji teknikleriyle teşhisleri zor olan çok küçük taneli, kristal yapısı düzenli ve tekrarlı malzemelerin mineralojilerinin tespitinde X ışını kırınım yöntemine başvurulabilir. Deneyde çok ince öğütülmüş numunenin üzerine X ışınları gönderilir. Elde edilen örnekten düzenli olarak yansıyan ışınlar fotoğraf kağıdına yansıtılarak veya sayaçla ölçülerek, kristal içinde atomların dizildiği düzlemler arasındaki uzaklıklar ve X ışınlarının bu düzlemlerden yansıma şiddeti ölçülmektedir. Her kristalin atom yapısı farklı olduğundan emilen ve yansıyan ışın yoğunluğu da farklı olacaktır. Farklı kristal yapıya sahip minerallerin X ışını kırınım paternleri farklı olduğundan minerallerin tanımlanmasında öncelikle bu paternlere bakılmaktadır (Aytekin,2009).

Kil mineralleri bazı kayaç yapıcı minerallerin kimyasal bozuşmaları sonucu oluşan kristalsi maddelerdir. Kimyasal anlamda sulu alüminosilikatlar ve diğer metal iyonlarından oluşmuşlardır. Tetrahedral silika ile oktahedral alümina kristal levhalarının değişik bağlar ve farklı metalik iyonlarla birbirine bağlanması farklı kil minerallerinin oluşmasına sebep olmaktadır (Kayabalı, 2002). Doğada rastlanılan killer genellikle birkaç çeşit kil mineralinin ve kolloidal maddelerin karışımından oluşmuştur. X ışını deneyi sonuçlarına göre kil zeminde ağırlıklı olarak halosit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$), kuvars (SiO_2), muskovit ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$), kalsit (CaCO_3) içeren maliss kiline ve silisyum dioksit (SiO_2), kükürt trioksit (SO_3), kalsiyum karbonat (CaCO_3), alüminyum oksit (Al_2O_3), potasyum oksit (K_2O) kimyasal bileşenlerine rastlanmıştır.

Uçucu küllerin mineralojik birleşimleri, kömürde bulunan minerallere ve proses koşullarına (kömür hazırlama ve yanma gibi) bağlıdır. Düşük kireçli (CaO) Çatalağzı Termik Santrali uçucu külü çoğunlukla silissi camsı faz ve kuvars, mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), manyetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3) mineralleri içermektedir. Aruntaş'ın yaptığı çalışmada Çatalağzı Termik Santraline ait uçucu külün mineralojik kompozisyonu belirlenmiş, Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3: Çatalağzı Termik Santraline ait uçucu külün mineralojik kompozisyonu (Aruntaş, 2006).

Mineral adı	Mineral yüzdesi
Mullit	18.1
Kuvartz	10.9
Manyetit	0.2
Hematit	0.1
Anhidrit	-
Serbest CaO	0.7
Plajiyoklaz	-
Camsı ve amorf faz	~70

Yapılan X ışını kırınım deneyi sonuçlarına göre uçucu külün çoğunlukla kuvars ve mullit minerallerinden oluştuğu gözlemlenmiştir.

Silikat ve alüminatlar gösterdikleri pozolanik etkilerle uçucu kül katılan zemin numunelerinde mukavemet artışına sebep olurlar. Serbest kireç (CaO), su (H₂O) ve silisyum dioksit (SiO₂) tepkimeye girerek kalsiyum silika hidrat (CSH) jellerini oluşturmaktadır. Kalsiyum hidroksit (Ca(OH)₂) ile silisyum dioksit de tepkimeye girerek bu jelleri oluşturabilmektedir. Çimentonun da ana bileşenlerini oluşturan, gösterdikleri pozolanik özellik nedeniyle mukavemet artışında önemli etkiye sahip silikat ve alüminat bileşenleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4: Silikat ve alüminat bileşenler.

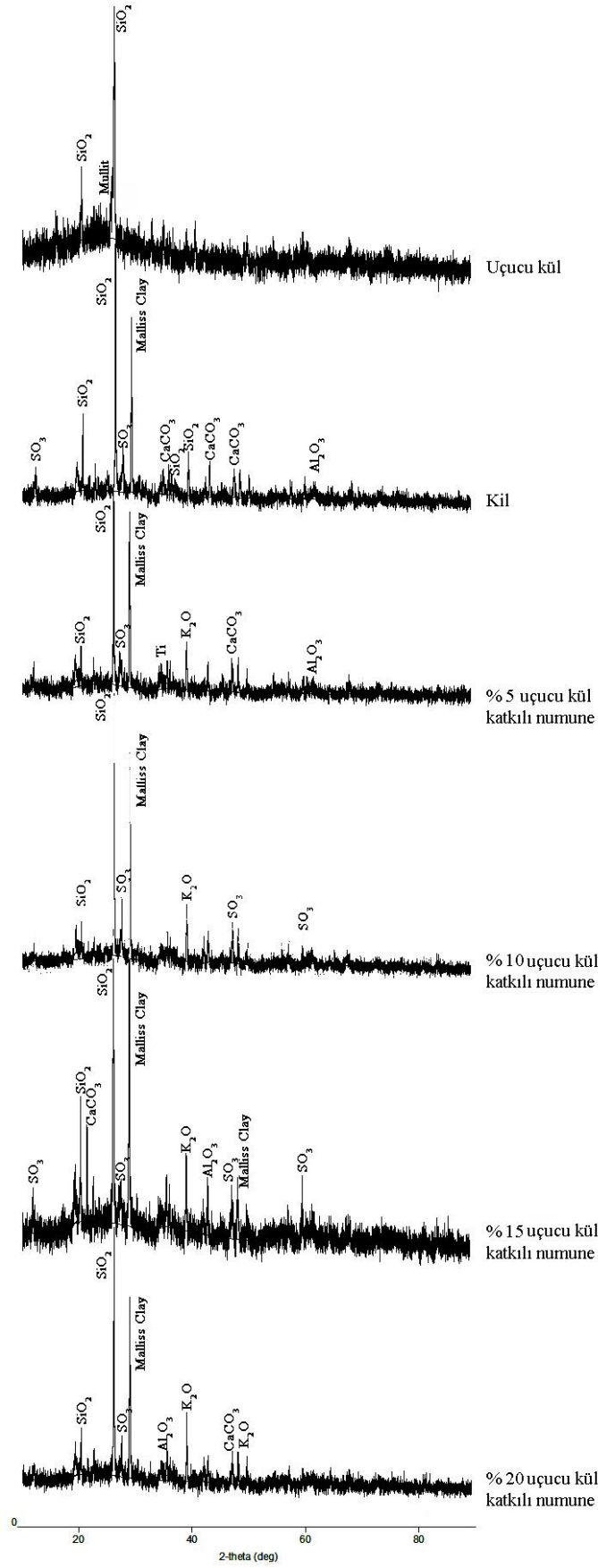
Bileşen	Açılımı
C ₂ S (Silikat)	3CaO + SiO ₂
C ₃ S (Silikat)	2CaO + SiO ₂
C ₃ A (Alüminat)	3CaO + Al ₂ O ₃
C ₄ AF (Alüminat)	4CaO + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃

Kireç taşının yüksek sıcaklıkta (~950 °C) pişirilmesiyle kalsiyum karbonat (CaCO₃) sönmemiş kirece (CaO) dönüşmektedir. Sönmemiş kirecin su ile söndürülmesiyle kalsiyum hidroksit elde edilir. Kalsiyum oksit pozolanik özellik gösteren silikat ve alüminatların yapılarına katılmaz ise ortamda bulunan serbest karbondioksit ile tepkimeye girerek kalsiyum karbonata dönüşür.

Uçucu küllü karışımlarda mukavemet artışı SiO₂, Al₂O₃, CaO, Ca(OH)₂ ve Fe₂O₃

bileşiklerince oluşturulan silikat ve alüminat jelleri tarafından kontrol edilmektedir. Uçucu kül, killi zemin ve karışımlara uygulanan XRD deneyi sonuçları Şekil 4.6'da verilmiştir. Karışımlara ait X ışını kırınım deney sonuçları değerlendirildiğinde SiO_2 miktarının %5 uçucu kül katkıli numunede en az şiddet değerini aldığı tespit edilmiştir. Kil zemine artan oranda uçucu kül katılması alüminyum oksit miktarında azalmaya sebep olurken, alüminyum oksit %10 uçucu kül katkıli numunede tükenmiştir. SiO_2 ve Al_2O_3 miktarında ise gözlenen azalmaların mukavemet artışına neden olduğu düşünülmektedir.





Şekil 4.6: Yalın numuneler ve karışımlara yapılan XRD sonuçları.

4.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçları

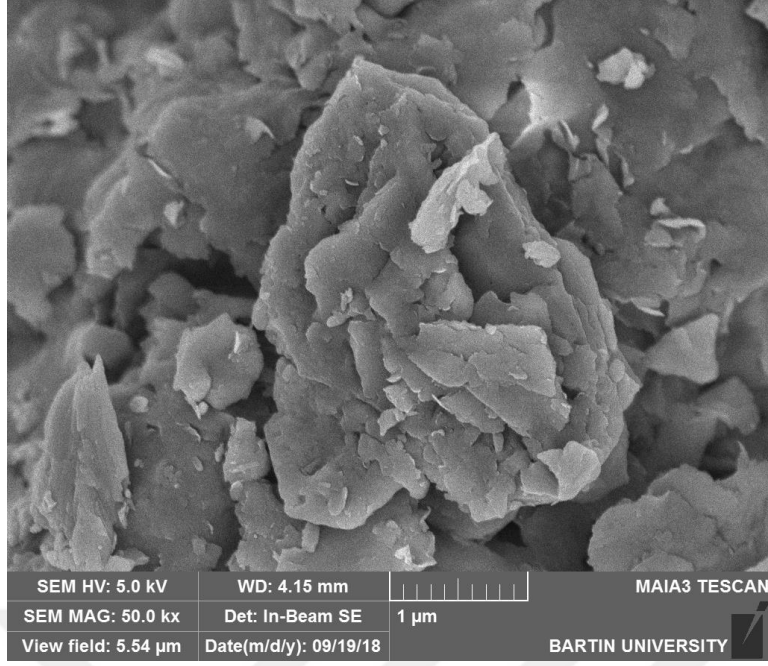
Taramalı elektron mikroskobu yöntemi, zeminlerdeki kil minerallerinin ve uçucu kül minerallerinin biçimleri, kristal şekilleri ve büyüklüklerinin tespitinde kullanılmaktadır. Yapılan deneyler ile, kil, kül ve karışımlardan oluşan numuneler elektron mikroskobuyla 200 kat ila 50.000 kat arasında yakınlştırılarak elektron mikroskobu görüntüleri elde edilmiştir.

Kil mineral tanelerinin büyüklük, çap ve şekilleri ait oldukları kil mineral sınıfı hakkında bilgiler vermektedir. Kil minerallerinin sınıflandırılması ile ilgili olarak, bazı kil minerallerine ait özellikler Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.5: Bazı kil minerallerine ait özellikler (Önalp, 1983).

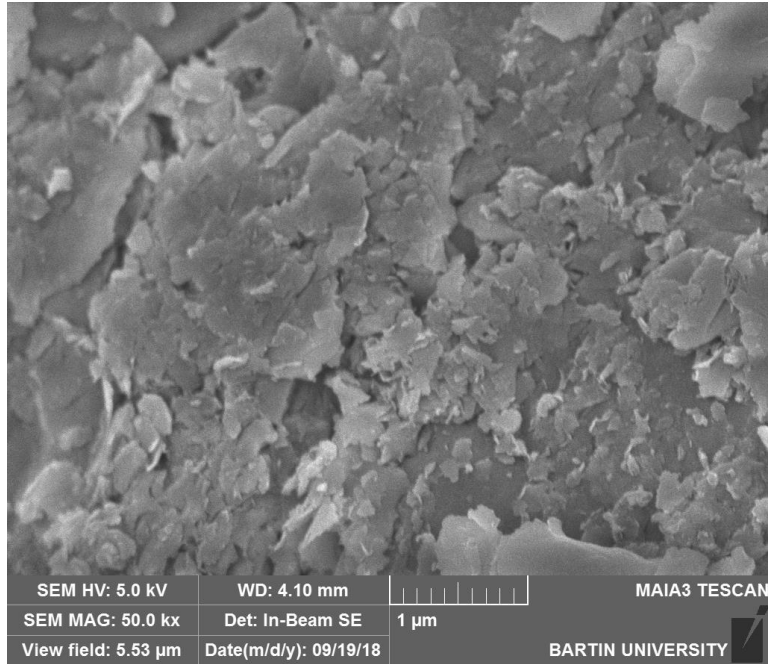
	Montmorillonit	İllit	Kaloinit	Klorit
Tane Büyüklüğü	10Å-1µ	0.1µ-2µ	0.1µ-5µ	5µ
Tane Şekli	Eş boyutlu yaprak	Pul	6 köşeli pul	Pul
Tane Çapı	10 Å	30 Å	0.05-0.2	
Özgöl Yüzeyi	50-800	65-100	10-20	5-50
Likit Limit (%)	110-710	60-120	29-70	44-47
Plastisite İndisi	51-100	34-60	26-38	8-12
Şişme-Büzülme	Yüksek	Orta	Düşük	Düşük
Özgöl Ağırlık	2.35-2.70	2.60-3.00	2.60-2.80	2.60-2.80

Şekil 4.7’de verilen SEM görüntüsünde katkısız kil numunesi gözlenmiştir. Pul şeklinde tabakalı yapıya sahip numune 2.5 µm boyutunda olup 1µm’den küçük farklı ebatlardaki minerallerin bir araya gelmesiyle tabakalı yapıya sahiptir.



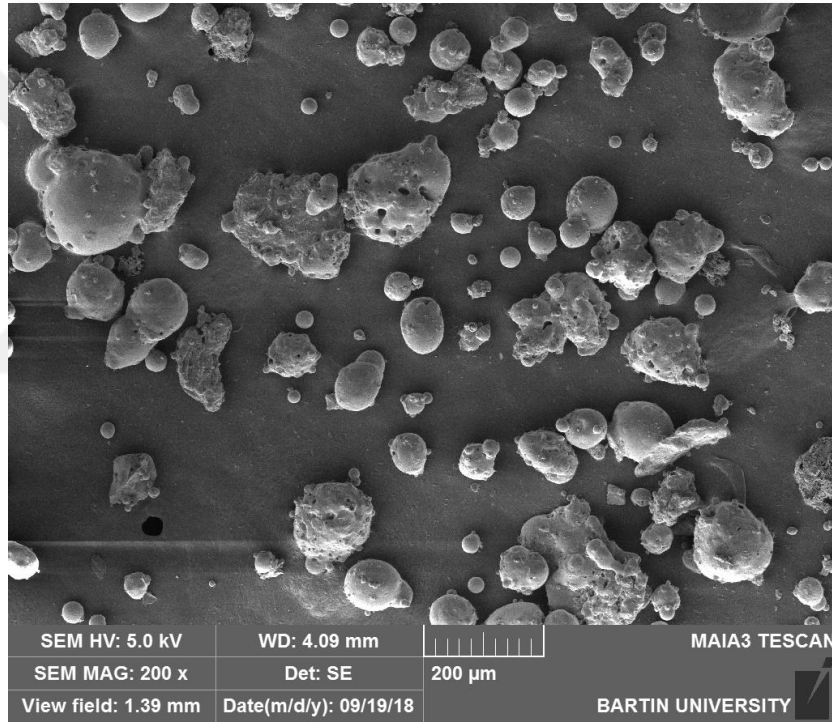
Şekil 4.7: Kil zemine ait SEM görüntüsü.

Kil numunesine ait Şekil 4.8’de verilen deney görüntüsünde ise, kil mineral tanelerinin 0.2 μ m’den küçük birimlerden meydana geldiği görülmektedir. Deneysel çalışmanın önceki aşamalarında kil örneklerine ait elde edilen kıvam limitleri değerleri ile SEM görüntüleri birlikte değerlendirildiğinde, kil numunesinin illit birimlerden oluştuğu düşünülmektedir.

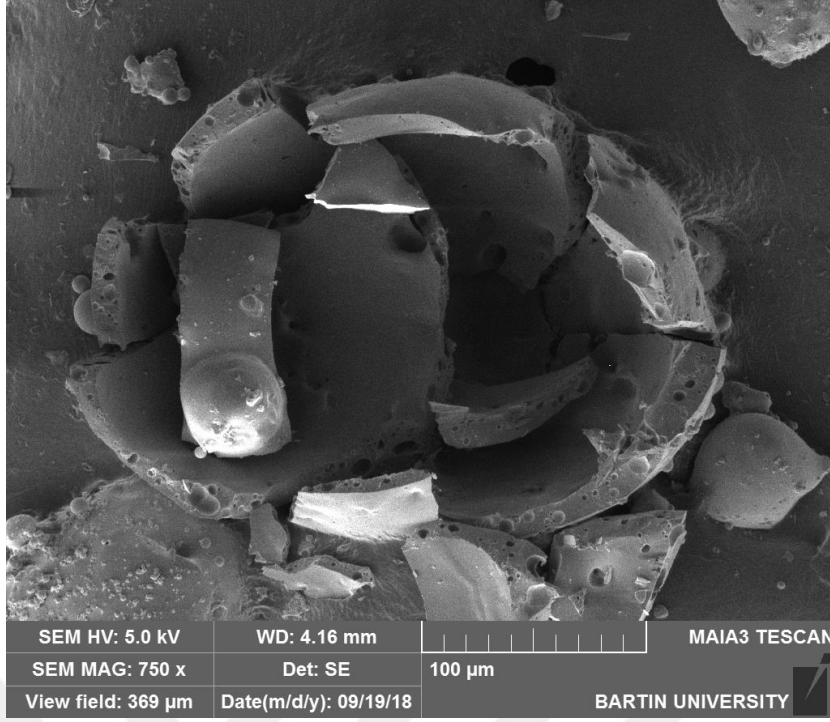


Şekil 4.8: Kil zemine ait SEM görüntüsü.

Çatalağzı Termik Santrali uçucu külüne ait SEM görüntülerine göre, danelerin 200 μm 'den küçük farklı çapta olduğu anlaşılmıştır (Şekil 4.9). Bu daneler çoğunlukla küreseldir. Bunun yanında içi ve etrafı mikro küreler ile dolu büyük daneler de bulunmaktadır. Büyük daneler ergimiş kildeki gaz çıkışındaki düzensizlik nedeniyle esas küreye ilaveten farklı boyutlarda meydana gelen camsı kabarcıkların oluşumu ile meydana gelebileceği gibi belirli bir kürenin oluşumu esnasında kısmen kırılıp daha küçük küreler tarafından doldurulması yoluyla da oluşabilmektedir (Şekil 4.10). Tam küresel yapıların alüminyum silikat bileşiminde olduğu; köşeli yapıların kuvars, biyotit bileşiminde olduğu tespit edilmiştir. Uçucu küller gözenekli veya dolu camsı küresel taneler ile yanmamış mineralleri içeren süngerimsi ve köşeli aglomere tanelerden meydana gelmektedir (Ünver, 2015).

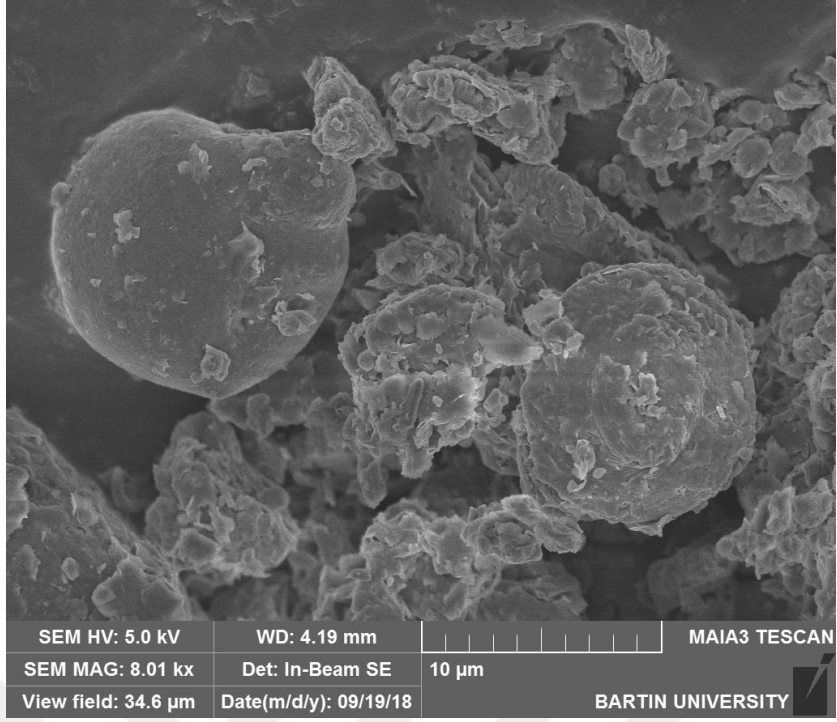


Şekil 4.9: Çatalağzı Termik Santrali uçucu külüne ait SEM görüntüsü.

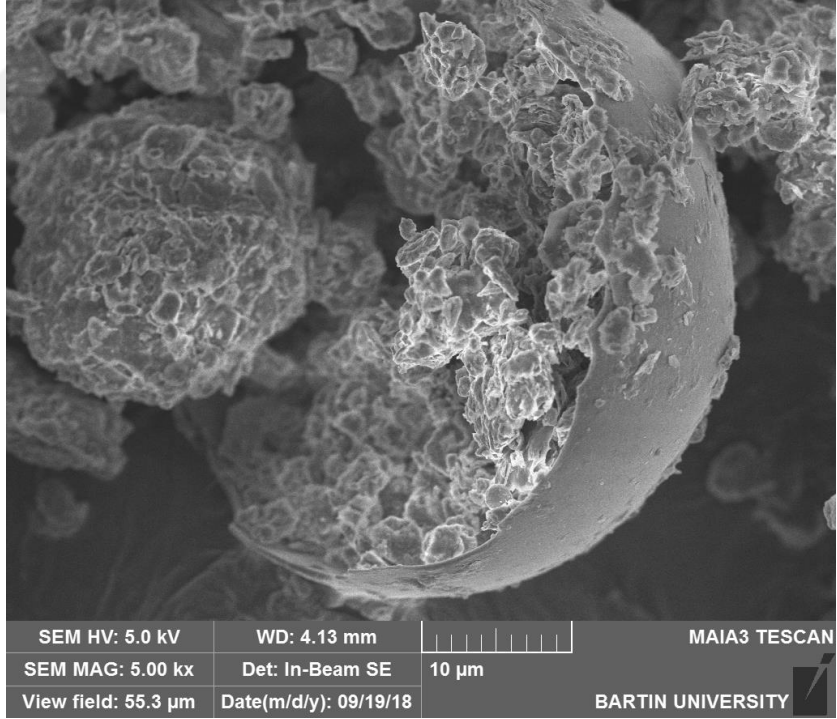


Şekil 4.10: Çatalağzı Termik Santrali uçucu külüne ait SEM görüntüsü.

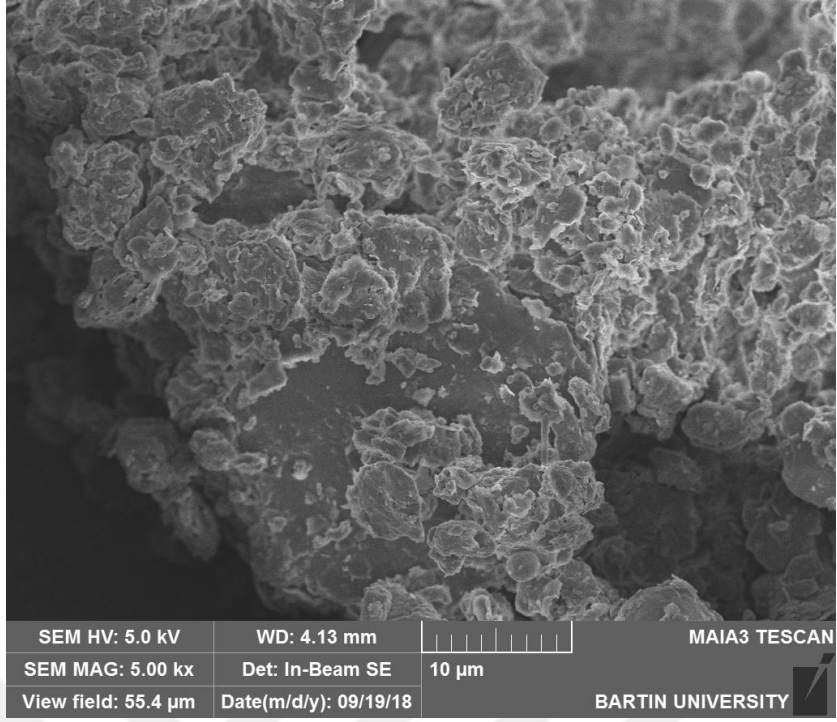
Uçucu kül katkılı killi zemin karışımlarına ait SEM görüntüleri Şekil 4.11-4.14'te verilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre, kil ve kül mineralleri arasında meydana gelen bağların silikat ve alüminatlarca oluşturulan jeller tarafından sağlandığı düşünülmektedir. Silikat ve alüminat jellerinin oluşması için CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 bileşenlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Oluşturulan zemin karışımlarında bileşenlerin mevcut olması CSH jellerinin oluşmasına dolayısıyla dane çapında artışa, çimentolaşmaya, artan kür süresiyle birlikte numunelerin gevrek bir yapıya bürünmelerine sebep olmuştur.



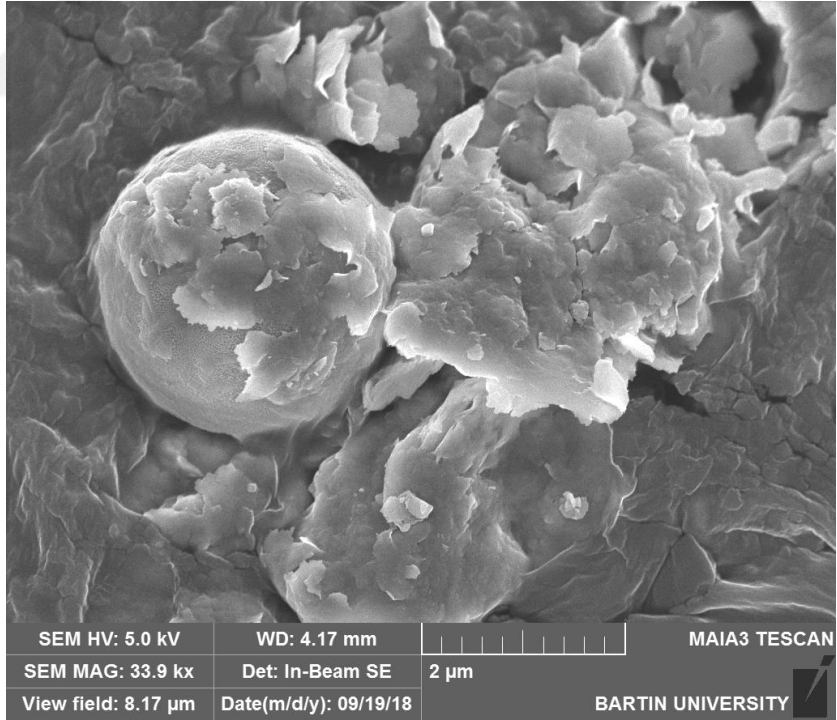
Şekil 4.11: Karışıma ait SEM görüntüsü.



Şekil 4.12: Karışıma ait SEM görüntüsü.



Şekil 4.13: Karışıma ait SEM görüntüsü.



Şekil 4.14: Karışıma ait SEM görüntüsü.

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu tez çalışması kapsamında oturma potansiyeli yüksek, taşıma gücü düşük olan Kutlubey bölgesine ait yüksek plastisiteli killi zeminlerin Çatalağzı termik santral atığı uçucu külleriyle iyileştirilmesi araştırılmıştır. Üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açısındaki artışlar birlikte değerlendirildiğinde, genel olarak zemine ağırlıkça farklı oranlarda uçucu kül takviyesi zeminin kayma dayanımını arttırmıştır. Araştırılan kür sürelerinde uçucu kül katkısının ağırlıkça zemine oranla %10'un üzerinde katılması kayma dayanımını önemli ölçüde etkilememiştir. %10 katkılı numunenin kayma mukavemeti salt zemin numunesine oranla %156 oranında iyileşirken, %15 ve %20 katkılı karışımların kayma dayanımı değerleri %10 katkılı karışıma oranla $\pm 0,07$ değişiklik göstermiştir. Bu değişim ihmal edilebilir düzeyde olup; standart enerji prensibiyle hazırlanan numunelerin kimyasal dizilimi, kil zemin numunesinin tabakalanma durumu, zemin bünyesindeki silt ve kum birimlerinin eşit dağılması, deney aletinin hassasiyeti gibi nedenlerden ileri gelebilmektedir. Uçucu kül katkı oranının %10 olarak tercihi kohezyon ve içsel sürtünme açısı gibi kayma mukavemeti parametrelerinde önemli oranda artışa sebep olmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalara bakılarak kohezyon değerlerindeki artışın uçucu külün puzolanik özelliğinden, içsel sürtünme açısındaki artışın ise uçucu külün danecik yapısından ileri geldiği söylenebilir.

Killi zeminlerin mekanik özelliklerini daha iyi hale getirmek için ilave edilen uçucu külün artan oranlarında numuneler maksimum kayma mukavemetlerine daha geç kür sürelerinde ulaşmıştır. Kür sürelerine göre incelenen karışımlarda maksimum kayma dayanımı %5 uçucu kül katkılı numunede 8.günde, %20 uçucu kül katkılı karışımda ise 32.günde tespit edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler doğrultusunda uçucu kül miktarındaki artışın reaksiyon süresini arttırdığı ve 16.günde dahi etkileşimin devam ettiği söylenebilir.

Silikat ve alüminat bileşenleri gösterdikleri puzolanik özellik nedeniyle mukavemet artışında önemli etkilere sahiptir. Literatür çalışmaları incelendiğinde serbest kireç miktarındaki artışın mukavemeti arttırdığı gözlemlenmiştir. Uçucu kül katılarak oluşturulan zemin karışımlarında fazlaca silisyum dioksit bulunurken silikatın oluşması için gerekli

diğer bileşen olan serbest kirecin bulunmaması bu durumun nedeni olarak gösterilebilir. Ülkemizde elektrik üretimi esnasında atık malzeme olarak çıkan uçucu küllerin santralden uzak yerlere taşınması gerekmektedir. Depolama esnasında ek taşıma masrafı ve zaman kaybı oluşmaktadır. Bununla birlikte, açık sahalarda uçucu küllerin depolanması ile oluşan çevre kirliliği, tozlanma, tarım ürünlerine zarar verme, radyasyon, toprakta süzülme vs. meydana gelmektedir. Tez çalışması olarak bu akademik çalışma ile, Çatalağzı termik santral atığı uçucu küllerinin Bartın ili Kutlubey-Yazıcılar bölgesi killi zeminlerinin stabilizasyonunda etkin olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Bununla birlikte uçucu külün çimento üretiminin yanında toprak dolgu barajlar ve seddeler gibi İnşaat Mühendisliğinin farklı uygulama sahalarında kullanılabileceği, uçucu kül katkısı ile iyileştirilmiş yüksek plastisiteli killerin mekanik özelliklerine ait deneysel sonuçlardan anlaşılmıştır. Stabilize edilmiş yumuşak killi zeminleri özellikle toprak dolgu barajlarda ve seddelerde kullanabildiğimizde termik santrallerin depolamak zorunda oldukları uçucu küllerin değerlendirilebileceği yapılan bu çalışma ile öngörülmüştür. Diğer taraftan, üstyapının konumlandığı ve karayollarında çökme problemlerinin yaşandığı killi zemin ortamlarının uçucu kül ilavesiyle stabilize edilmesinin önemi yapılan bu tez çalışmasıyla ele alınmıştır.

Yapılan tez çalışmasında Bartın ili Kutlubey-Yazıcılar bölgesi killi zeminlerinin Çatalağzı Termik Santrali uçucu küleriyle iyileştirilmesi çeşitli deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Benzer çalışmalar yapılarak farklı bölgelere ait zeminlerin farklı uçucu küllerle iyileştirilmesinin araştırılmasıyla literatür zenginleştirilmelidir. Böylelikle termik santral atığı uçucu küllerin kullanım alanı arttırılmış, küllerin çevreye verdiği zarar azaltılmış olacaktır.

KAYNAKLAR

- Aksoy, H.S., Yılmaz, M. ve Akarsu, E.E. (2008). Killi bir zeminin Tunçbilek uçucu külü kullanılarak stabilizasyonu. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 6 (3): 89-91.
- Alkaya, D. (2009). Uçucu küllerin zemin iyileştirmesinde kullanılmasının incelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5 (1): 63-69.
- Arioğlu, E., Ökten, G. (1989). Avrupa ülkeleri linyit madenciliği ve Türkiye. *Yerbilimleri Dergisi*, 14 (15): 37-38.
- Aruntaş, H.Y. (2006). Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21 (1): 193-195.
- Aytekin, S. (2009). Uçucu küllerin killi zeminlerin ıslahında kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, 82 s.
- Beer, F.P. ve Johnston, E.R. (2003). Cisimlerin mukavemeti, Bölüm 2. Eksenel Yükleme Gerilme ve Şekil Değiştirme, Çev.; Akgün, Ö.R., Yazıcıoğlu, O ve Kotil, T.; Beta Yayınları, İstanbul, s. 47-48.
- Chu, S.C. ve Kao, H.S. (1993). A study of engineering properties of a clay modified by fly ash and slag: Fly Ash for Soil Improvement. *Geotechnical Special Publication*, 36: 89-100
- Coduto, D.P. (2000). Temel Tasarımı İlkeler ve Uygulamalar, Bölüm 3. Zemin Mekaniği, Çev.; Kayabalı, K. ve Mollamahmutoğlu, M.; Gazi Kitabevi, Ankara, s. 68-77.
- Çetin, A.Y. (2011). Yüksek plastisiteli kil zeminlerin alternatif malzemeler ile stabilizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 121 s.
- Das, M.B. (2007). Principles of foundation engineering, Bölüm 2. Natural Soil Deposits and Subsoil Exploration, Thomson Learning, Toronto, s. 85-95.
- Das, A., Jayashree, Ch. ve Viswanadham, B.V.S. (2009). Effect of randomly distributed geofibers on the piping behaviour of embankments constructed with fly ash as a fill material. *Geotextiles and Geomembranes*, 27 (5): 341-349.
- Genç, D. (2011). Zemin mekaniği ve temeller, Bölüm 9. Kayma Direnci, TMMOB Jeoloji mühendisleri odası yayınları, Ankara, s. 367-383.
- Göktepe, F., Totiç, E., Acar, F. ve Yaşar, M. (2019), Kutlubey bölgesi killerin mekanik özelliklerinin uçucu kül ile stabilizasyonu. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Konferans*, 26-28 Eylül 2018, İstanbul.

KAYNAKLAR

- İmançlı, G. (2002). Uçucu küllerin zemin özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 191 s.
- İnan, G., Sezer, A., Ramyar, K. ve Yılmaz, R. (2005). Değişik uçucu küllerin yüksek plastisiteli kilin serbest basınç dayanımına etkisi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 20 (1): 20-24.
- Jones, D.E. ve Holtz, W.G. (1973). Expansive soils – the hidden disaster. *Civil Engineering ASCE* 43 (8): 49-51.
- Joshi, R.C., McMaster, H.M. ve Duncan, D.M. (1975). New and conventional engineering uses of fly ash. *Journal of Transportation Engineering*, 101: 37-44.
- Kurama, H., Bilgiç, C. ve Kaya, M., (1999). Evaluation of Tunçbilek coal fired power plant flyash for industrial usage. *Journal of Ore Dressing*, 1 (2): 791-806.
- Mitchell, J.K. (1993). Fundamentals of soil behavior, Bölüm 11. Strength and Deformation Behavior, John Wiley and Sons, Inc. New York. s. 436-438.
- Özaydın, K. (2015). Zemin mekaniği, Bölüm 7. Zeminlerin Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı ve Kayma Mukavemeti, Birsan Yayınevi, İstanbul. s. 213-259.
- Parker, D.G., Thorton, S. ve Cheng, C.W. (1977). Permability of fly ash stabilized soils. *Conference of The Geotechnical Engineering Division, ASCE Geotechnical Practise for Disposal of Solid Waste Materials*, Michigan. 63-70.
- Tan, O. ve İyisan, R. (1996). Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi*, 24-25 Ekim 1996, İzmir, s. 417-426.
- Tokay M. (1989). Uçucu küllerin mineralojik kompozisyonlarının hidrasyon ve pozolanik reaksiyonlara etkileri. *Türkiye İnşaat Mühendisliği 10. Teknik Kongresi*, 1 Aralık 1991, İzmir, s. 389-400.
- Tsonis, P., Christoulas, S. ve Kolias, S. (1983). Soil improvement with coal ash in road construction. *Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 23-26 Mayıs 1983, Helsinki, s. 961-4.
- TÜİK (2017), Termik santral su, atıksu ve atık istatistikleri, 2016, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=24873> (01.01.2019).
- Türker, D., Cokca, E. (2006). Effects of addition of fly ash on swell potential of an expansive Soil, in *Expansive Soils-Recent Advances in Characterization and Treatment*. Ed.; Al Rawas, A.A. and Goosen, M.F.A. Taylor and Francis Group, Balkema, London. s. 453-463

KAYNAKLAR

- Türker, P., Erdoğan B., Katnaş, F. ve Yeğinobalı (2009), Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri. Bölüm 3. Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Analiz Sonuçları, TÇMB / AR-GE, Ankara. s. 32-38.
- Türkmenoğlu, M. (2010). Uçucu küllerin liç karakteristiklerinin ve çevreye etkilerinin araştırılması. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, 161 s.
- Usmen, M., Bowders, I. ve Gidley I. (1987). Stabilized Fly Ash Use As Low- Permeability Barriers, *Geotechnical Special Publication ASCE*, Newyork. 13.
- Ünver, E. (2015). Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül İle İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 137 s.
- Yılmaz, F. (2016). Zemin stabilizasyonunda uçucu kül kullanımı. *International Symposium on Environment and Morality*, 4-6 Kasım 2016, Alanya. s. 1175-1180.
- Yılmaz, Y. ve Sevençan, Ü. (2010). Polipropilen fiber ve uçucu kül katkılı Ankara kilinin bazı geoteknik özelliklerinin araştırılması. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi*. 30 Eylül-1 Ekim 2010, İstanbul, s. 135-141.

EKLER

EK 1: Çeşitli deneylere ait sonuç tabloları.

Atterberg kıvam limitleri deney sonuçları tablosu

Uçucu Kül (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)
0%	66	31	35
5%	47	31	17
10%	45	28	17
15%	44	29	15
20%	42	27	15
25%	41	28	13

Standart proktor deney sonuçları tablosu

Açıklama	Uçucu kül (%)					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
γ_{kmak} (kN/m ³)	15,23	15,97	16,02	15,72	15,62	15,57
W _{opt} (%)	16	21	18	16	21	21

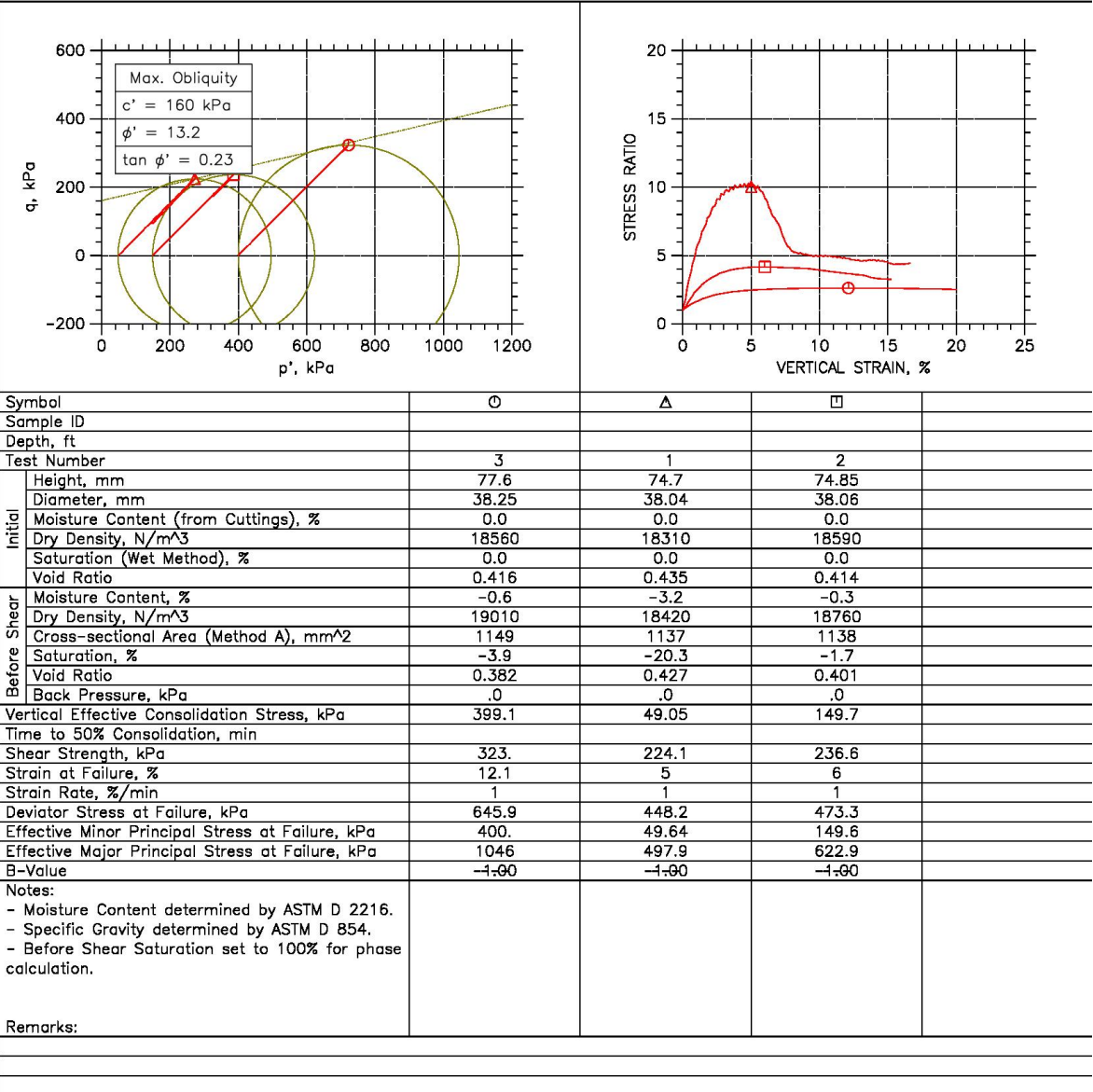
Üç eksenli deney sonuçları kür sürelerine göre kohezyon ve içsel sürtünme açısı

Kür Süresi	Uçucu kül içeriği (%)									
	0%		5%		10%		15%		20%	
	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)
1 gün	85	6	58	8	76	9	141	15	37	16
8 gün	-	-	234	9	134	10	151	19	150	16
16 gün	-	-	160	13	147	16	142	17	131	17
32 gün	-	-	157	9	146	18	134	18	126	21

EK 2: Üç eksenli deney aleti programı deney sonuçları örneği (16 gün kür süresi, 50 kPa-150 kPa-400 kPa çevre basınçları).

Client:	
Project Name: 16-5	
Project Location: Bartın	
Project Number: 1	
Tested By: Fatih	Checked By:
Boring ID:	
Preparation:	
Description: 16.g/n %5 400kPa	
Classification:	
Group Symbol:	
Liquid Limit: 0	Plastic Limit: 0
Plasticity Index: 0	Estimated Specific Gravity: 2.68

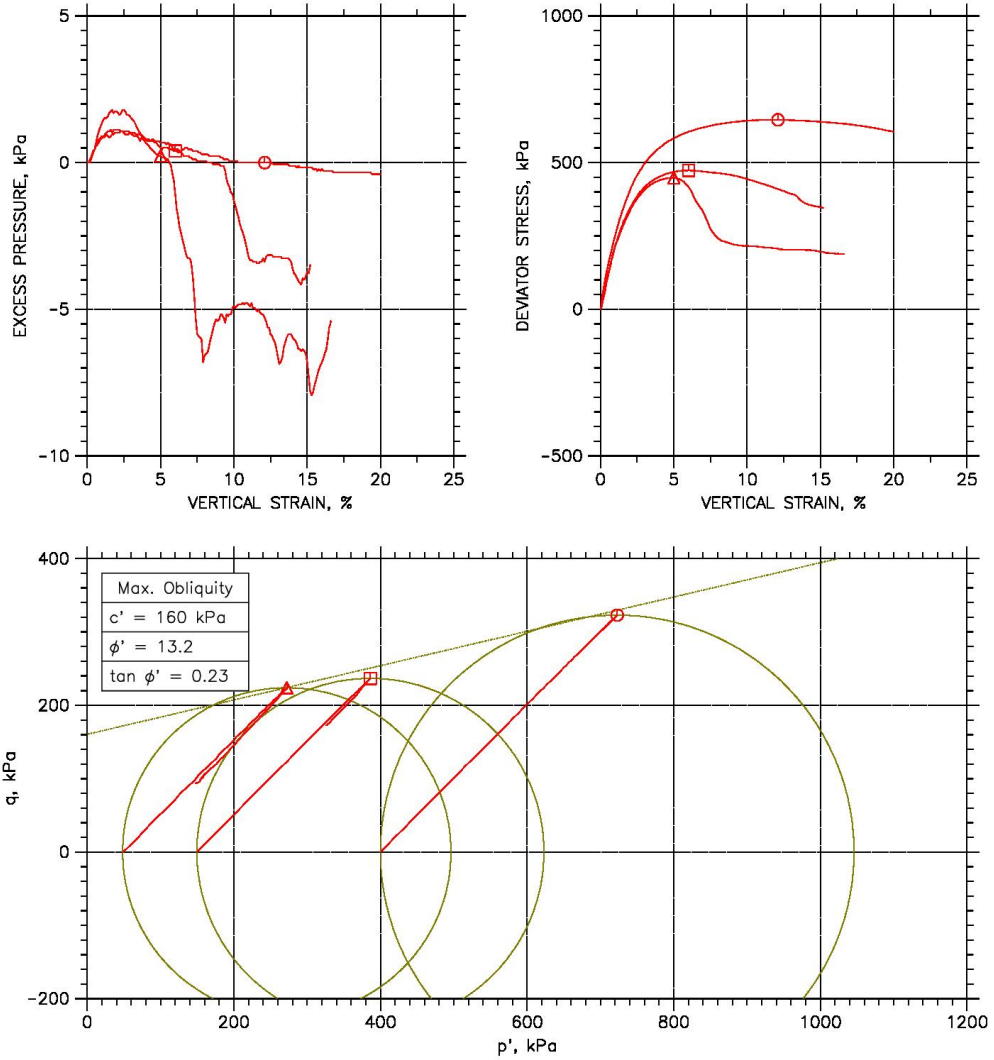
by ASTM D4767



Thu, 08-MAR-2018 10:41:43

EK 2: (devam ediyor.)

by ASTM D4767

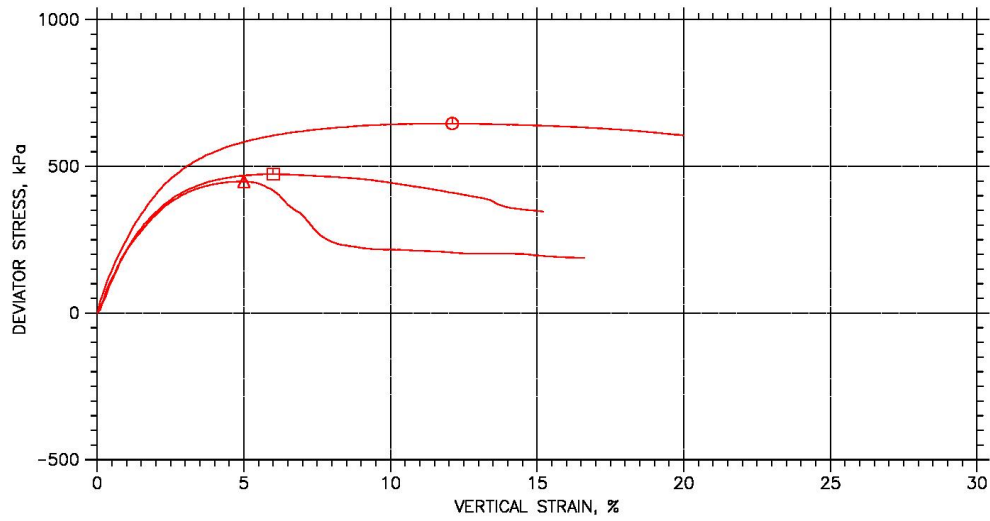
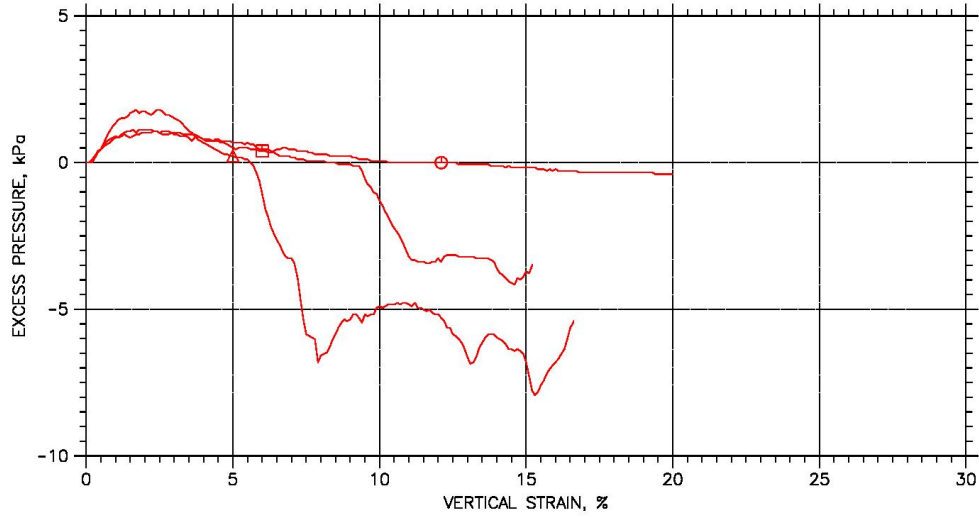


	Sample No.	Test No.	Depth	Tested By	Test Date	Checked By	Check Date	Test File
⊙		3		Fatih	8.03.2018			16-%5- 400 kpa UU.dat
Δ		1		Fatih	08.03.2018			16-%5- 50 kpa UU.dat
▣		2		Fatih	08.03.2018			16-%5- 150 kpa UU.dat
		Project: 16-%5 uu			Location: Bartın		Project No.: 1	
		Boring No.:			Sample Type:			
		Description: 16.g n %5 400kPa						
		Remarks:						

Thu, 08-MAR-2018 10:41:46

EK 2: (devam ediyor.)

by ASTM D4767



Sample No.	Test No.	Depth	Tested By	Test Date	Checked By	Check Date	Test File
⊙	3		Fatih	8.03.2018			16-%5- 400 kpa UU.dat
Δ	1		Fatih	08.03.2018			16-%5- 50 kpa UU.dat
□	2		Fatih	08.03.2018			16-%5- 150 kpa UU.dat
				Project: 16-%5 uu		Location: Bartın	Project No.: 1
				Boring No.:		Sample Type:	
				Description: 16.gln %5 400kPa			
				Remarks:			

Thu, 08-MAR-2018 10:41:47

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Fatih ACAR
Doğum Yeri ve Tarihi : Çanakkale, 21.04.1993

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği
Yüksek Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce
Bilimsel Faaliyet/Yayınlar : International Congress on Engineering and Life Science, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Konferansı. (Kutlubey bölgesi killerin iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar bildiri olarak yayınlanmıştır.)

İş Deneyimi

Stajlar : Kanuni bulvarı yapım inşaatı / Trabzon. Tünel, karayolu, köprü ve viyadük inşaatları
Dardanel yapı denetim ltd. şti. / Çanakkale
Çalıştığı Kurumlar : Çanakkale Geoteknik İnşaat, Acar afr mimarlık mühendislik inşaat turz. sos. hizm. san. ve tic. ltd. şti.
Projeler : Çeşitli konut inşaatı statik projeleri, görselleştirme sunuları, yarı olimpik havuz inşaatı, taşkın koruma inşaatları, tersip bendi, menfez geçitler, çevre düzenleme projeleri kapsamında müteahhitlik işleri.

İletişim

E-Posta Adresi : fath_93@hotmail.com
Telefon : +90 541 767 05 88
Tarih : 12/07/2019